

TEMA 3 – PREVIOS

El Protocolo de Kioto

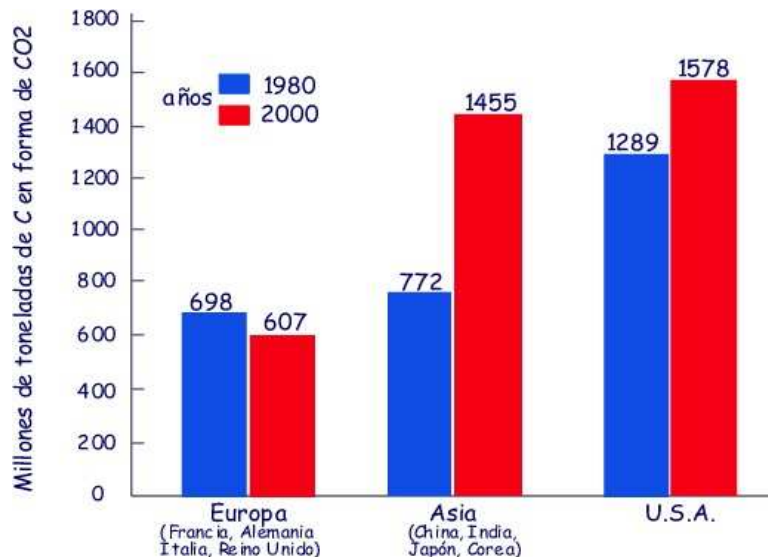
Objetivos

Miembros representativos de 39 gobiernos elaboraron y firmaron, en diciembre de 1.997, en Kioto, Japón, un Protocolo por el que se comprometían, una vez que fuese ratificado el proyecto por un número suficiente de países —cuyas emisiones conjuntas de CO₂ o equivalentes superasen el 55% de las emisiones globales—, a llegar entre el año 2008 y el 2012 a una reducción total de sus emisiones de CO₂ de un 5% con respecto a los niveles emitidos en 1990. El tratado ha sido ratificado por la Unión Europea pero no por los Estados Unidos. Cuando por fin el gobierno de Rusia se decidió a ratificarlo, el tratado entró en vigor en febrero del 2005 (por haberse alcanzado entre los firmantes el 55% de las emisiones globales).

Los objetivos a cumplir en el tratado original son diferentes para cada país. Así, a los países de la Unión Europea se les permite que se repartan entre ellos las cuotas de reducción, para satisfacer un total de bajada del 8%. El reparto permite que países de este grupo, como España, aumenten sus emisiones en un 15% (... pero al acabar 2005 ya eran un 50% superiores a las de 1990).

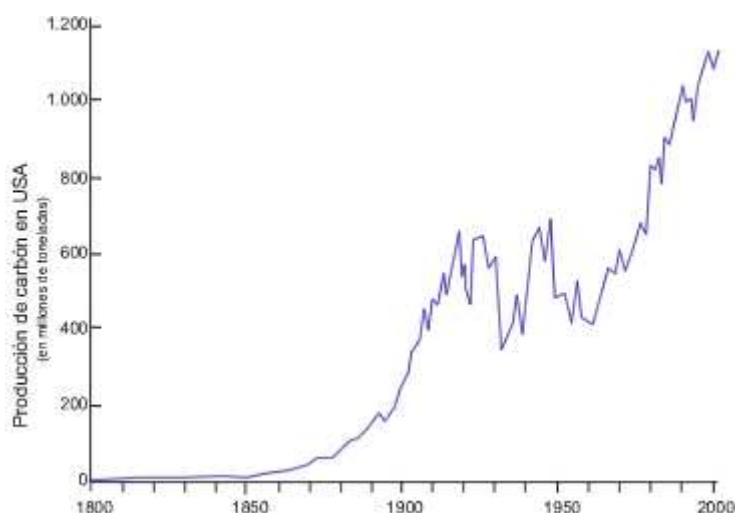
A pesar de que algunos países europeos, como España, difícilmente cumplirán lo pactado, es muy posible que el conjunto de la Unión Europea sí lo logre, sin necesidad de aplicar nuevas políticas, ni sufrir nuevos costes (si bien las emisiones del sector transporte han aumentado ya un 20 % entre 1990 y 2001...). Por eso algunos países de Europa son el motor del pacto, ya que es fácil firmar algo cuando no hay que sacrificar gran cosa. En efecto, Alemania, gracias al cierre de industria pesada tras su reunificación con la parte oriental rebajó sus emisiones per cápita de 12,2 toneladas/año en 1990 a 10,5 toneladas/año en 2004; el Reino Unido gracias al paulatino abandono del carbón desde los tiempos de Thatcher y su apuesta por el gas y la energía nuclear, pasó de 10,4 toneladas/año en 1990 a 9,6 toneladas/año en 2004; y finalmente, Francia, gracias a su opción de electricidad nuclear (el 80 % de su producción) pasó de tener en 1990 unas emisiones de CO₂ per cápita de 6,5 toneladas/año a tener en 2004 unas emisiones de 6,7 toneladas/año. Sin embargo, las emisiones per cápita de España aumentaron de 5,7 toneladas/año en 1990 a 9.0 toneladas/año en 2004 (fuente: EIA).

El telón de fondo del apoyo de estos países de Europa al Protocolo de Kioto es la política europea de abandono del carbón como fuente de energía eléctrica, en favor de las centrales movidas por energía nuclear y por gas metano. En efecto, la combustión de gas natural (metano) en las turbinas para la obtención de energía eléctrica emite aproximadamente 370 gramos de CO₂ por cada kWh producido, frente a 750 gramos por kWh en las turbinas movidas por carbón. Razón por la cual se denigran las ventajas del carbón, combustible barato y abundante, presentándolo a la población como sucio y anticuado. Apenas se menciona el motivo de la falta de competitividad del carbón europeo frente a los carbones de otros países exportadores, que gozan de minas a cielo abierto, de mucha más fácil explotación.



Emisiones de carbono en forma de CO₂ durante los años 1980 y 2000 en algunas regiones del mundo. Se observa una disminución en la Europa más desarrollada, y un aumento muy importante en USA y, sobre todo, en Asia, que antes del 2020 superará a los demás continentes.

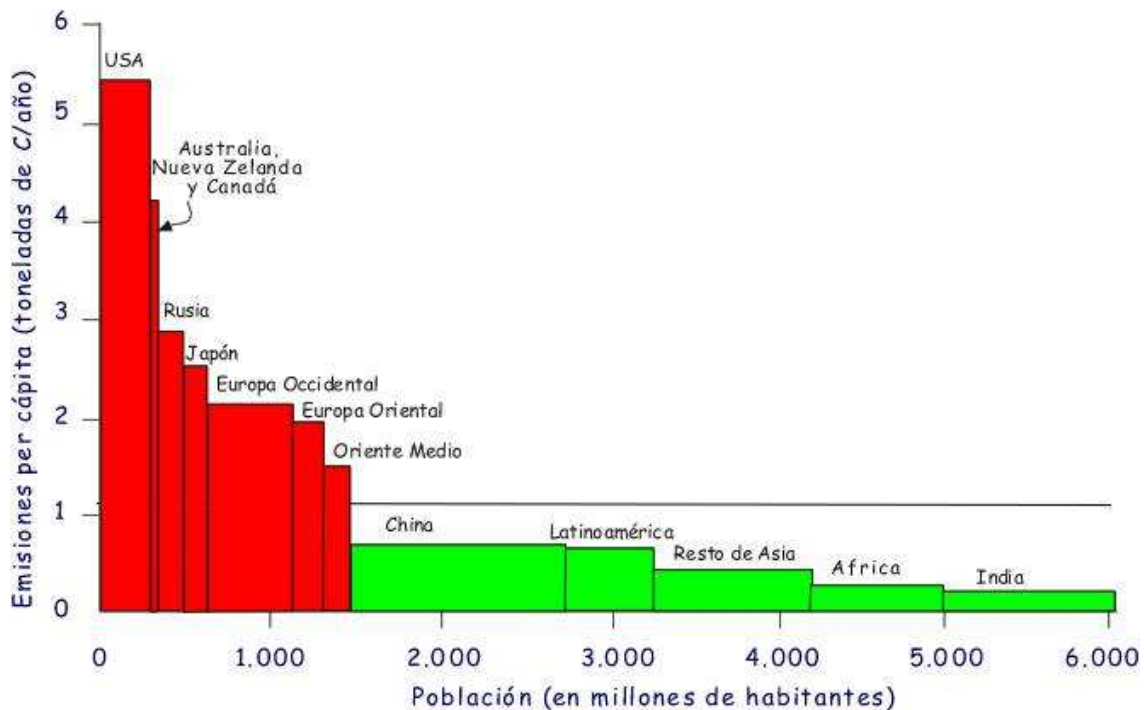
El problema es diferente con Estados Unidos, país al que se le pedía una reducción del 7%. En el año 2000, cuando decidieron definitivamente no ratificarlo, sus emisiones eran ya un 18% superiores a las de 1990. Las fuertes emisiones americanas se explican en gran parte por su baja fiscalidad en los combustibles, especialmente en la gasolina, y porque continúa basándose en el carbón propio como principal fuente energética de producción eléctrica (un 50%). De esta forma Estados Unidos mantiene su independencia en materia de generación eléctrica mucho mejor que Europa, que depende cada vez más de sus importaciones de gas natural, especialmente de Rusia (y de Argelia, en el caso de España).



Producción de carbón en USA. Su utilización masiva en la producción de electricidad y su abundancia y facilidad de extracción en los nuevos yacimientos a cielo abierto de la región occidental explican el fuerte crecimiento registrado en las tres últimas décadas (fuente EIA).

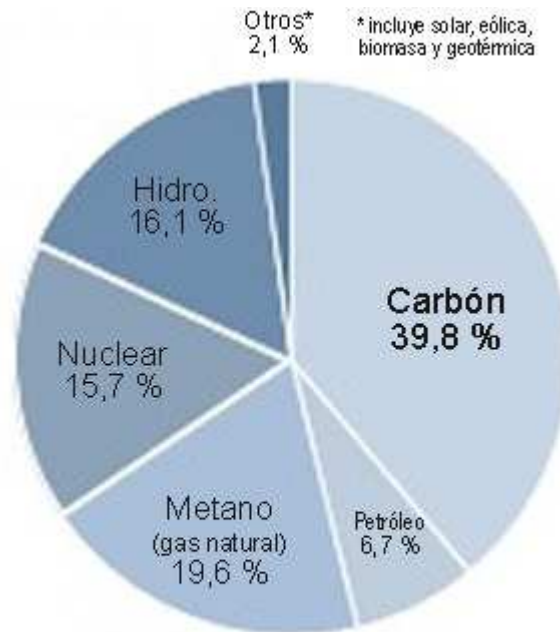
Fuera de obligaciones de reducción (aunque también firman el tratado les es suficiente el aplaudirlo) quedan China y la India, Brasil y México, países que, a pesar de la modernización de sus industrias, son los que más aumentarán sus emisiones de

carbón en los próximos años, debido al fuerte desarrollo del transporte público y privado. Por poner un ejemplo, **cada año** en China se construyen unas cien centrales térmicas de carbón con una capacidad total de 75.000 MW (cifra equivalente a casi dos veces la electricidad punta consumida en España).



Emisiones de CO₂ en diversas naciones y regiones del mundo en el año 2000. El área de los rectángulos es proporcional a las emisiones de cada una de ellas. En vertical se representan las emisiones per cápita. En horizontal se indica la población. La media per cápita global es algo superior a 1 tonelada de C (contenido en el CO₂) al año. Fuente: Houghton J.T., 2005, *Climate change and sustainable energy*, Weather, vol.60, no.7, basado en Grubb M., 2003, *The economics of Kyoto Protocol*, World Economics, 4(3).

Tanto en los Estados Unidos (FutureGen) como en Australia (Coal21), —en donde también la importancia del carbón es enorme (produce el 85% de su electricidad y representa el primer producto de exportación)—, se desarrollan en la actualidad costosos proyectos de investigación en centrales térmicas de nueva generación en donde el carbón se gasifica antes de ser quemado en turbinas de ciclo combinado (centrales IGCC), en las que el CO₂ producido se puede capturar. Dos de estas centrales pilotos IGCC existen también en Europa, una en Holanda y otra en España (Puertollano). También avanzan los sistemas de inyección y enterramiento geológico del CO₂ producido en formaciones salinas profundas y en pozos de petróleo y de gas anteriormente ya explotados. .
<http://www.ipcc.ch/activity/srccs/index.htm>



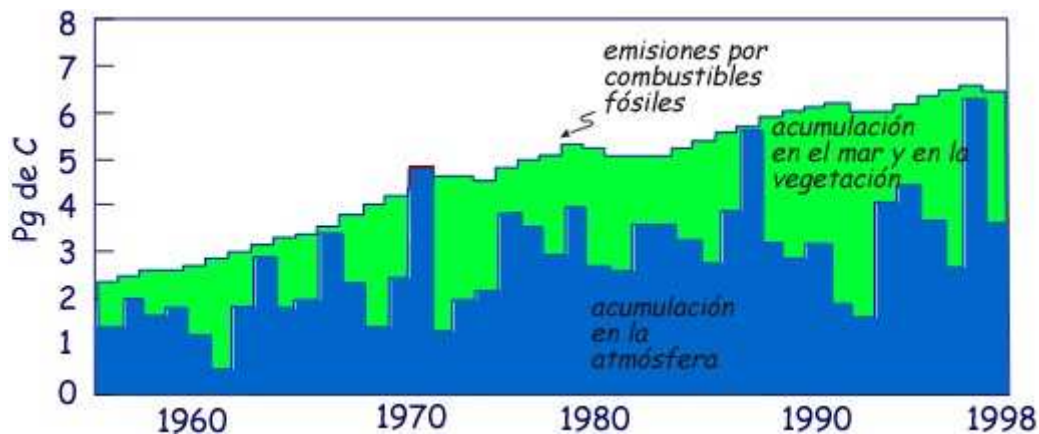
**Fuentes de energía eléctrica global
(% de cada combustible 2004)**

A pesar de la controversia y de las dificultades de asumirlo, el Protocolo de Kioto en sí tendrá unos efectos muy modestos. En realidad resulta que sólo *por respirar* la humanidad emite al año unos 2.500 millones de toneladas de CO₂,... que es una cantidad considerable, mayor que la disminución requerida en el Protocolo de Kioto (la reducción requerida en el Protocolo es de poco más de 1.000 millones de toneladas, un 5% de las emisiones de 1990). De hecho, si se llevase a cabo en los próximos años la reducción original pactada, los modelos climáticos estiman que sólo se evitaría con ello una subida inferior a una décima de grado con respecto a la prevista en caso de que no se tomase ninguna medida.

Sumideros

Un aspecto muy polémico del tratado de Kioto es la aceptación de que se aumente la cuota permisible de emisión a los países que lleven a cabo una política de reforestación, calculando la cantidad de CO₂ absorbido por los nuevos bosques que actúan como sumideros (un cálculo nada simple, pues depende de muchos factores). Australia, en una hábil negociación, consiguió que debido a su política de reforestación se le permitiera emitir en 2012 un 8 % más que en 1990, a pesar de que este país se encuentra a la cabeza mundial en las emisiones de CO₂ per cápita (sin embargo, ni aún así ha ratificado todavía el protocolo).

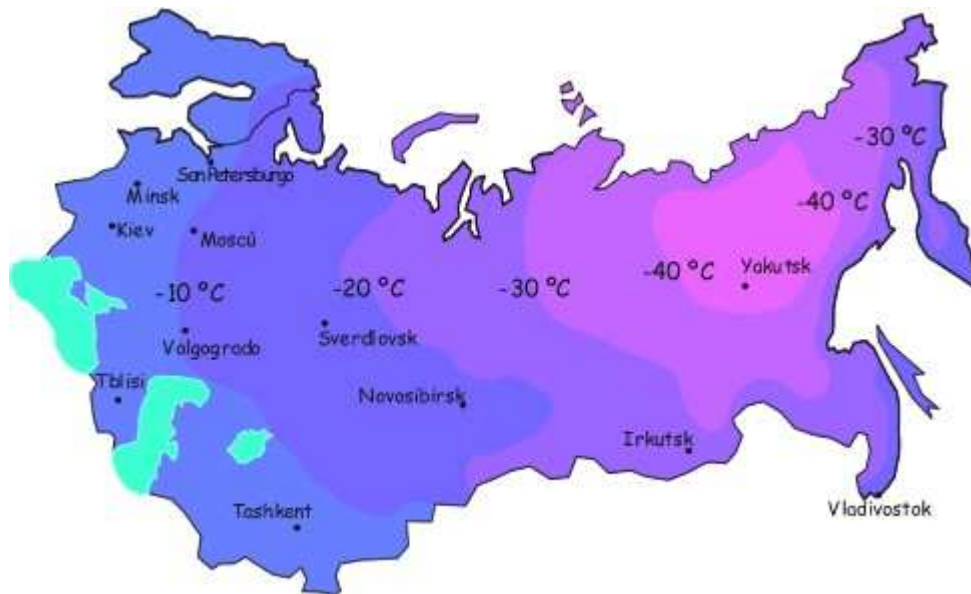
Todavía más difícil de calcular es la absorción de CO₂ producida por otros posibles cambios en los usos del suelo. Una posible contradicción de llevar a cabo una política de reforestación es que debería también tenerse en cuenta que un paisaje con más bosques es en algunos lugares, por ejemplo, en la tundra, un paisaje con menos albedo, es decir, menos reflectante. Por lo tanto la disminución de albedo que con los nuevos bosques se produciría en las latitudes altas —y que incrementaría la temperatura de la superficie— es posible que contrarrestara en algunos lugares sensibles el efecto de enfriamiento que ocasionaría la mayor absorción de CO₂.



Emisiones globales antrópicas de CO₂ en petagramos de carbono al año. Solamente una parte del CO₂ emitido (la mitad aproximadamente) se acumula en la atmósfera (área azul) ya que es considerable la parte del CO₂ que es absorbida fotosintéticamente por el plancton oceánico y la vegetación terrestre (área verde), con lo que aumenta así la biomasa terrestre (referencia: Quay P., 2002, Ups and Downs of CO₂ uptake, Science, 298, 2344). En el mar, aparte, existen otros muchos seres y sistemas vivos que precisan de CO₂ en forma de carbonato, aparte de la disolución natural del gas en el agua. De hecho, es por esta razón última que el mar es uno de los grandes acumuladores naturales de CO₂. Es capaz de disolver enormes cantidades del mismo. Sin embargo esto está llevando precisamente a una mayor acidificación de las aguas, lo que afecta directamente a los organismos vivos que precisan de la especie química carbonato para vivir. Esto puede hacernos pensar acerca de los delicados equilibrios que imperan en el medio ambiente de los que sólo somos escasamente conscientes.

Cuotas

En el protocolo de Kioto también se admite que pueda haber una compraventa nacional e internacional de créditos de emisiones entre empresas, a partir de las cuotas que se fijen para cada país en el Protocolo y que los gobiernos nacionales repartan entre sus empresas. De esta forma, después del reparto, un país que quisiese sobrepasar su cuota de emisión podría comprar parte de la cuota otorgada por ejemplo a Rusia o a algunos países del Este de Europa, y de esta forma emitir más de lo que en principio se le concedía. Ponemos este ejemplo ya que a Rusia, por razón de sus altas emisiones en 1990 —debido a la pervivencia de industrias con poca eficiencia energética— se le otorgaría en principio una cuota superior a la que necesitará utilizar en un futuro próximo con la nueva tecnología ("oficialmente" sus emisiones en el año 2.000 eran casi un 40% inferiores a las de 1990 y en el protocolo se le otorga un permiso de emisión en el 2012 del 100% de las emisiones de 1990). Por otra parte Rusia es un gran exportador de gas natural, combustible favorecido por el Protocolo. Así que será uno de los países más beneficiados económicamente a pesar de que un calentamiento le resultaría beneficioso.



Temperatura media de Enero en Rusia

Canjes

Otra complicación del protocolo de Kioto es permitir a los países firmantes que las reducciones de otros gases invernadero puedan también servir de créditos, que se canjeen por las emisiones equivalentes de CO₂. Estos gases son: el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), los perfluorocarburos (PFCs), los hidrofluorocarburos (HFCs) y el hexafluoruro de azufre (SF₆).

Las equivalencias no son fáciles de determinar, debido sobre todo a la diferente duración de vida de los gases en la atmósfera. Por ejemplo el "potencial de calentamiento global" (GWP) del metano es 56 con respecto al del CO₂ (GWP del CO₂ = 1) en un horizonte de 20 años, pero es 21 en un horizonte de 100 años (que es el que, por ahora, se utiliza en los canjes). Ocurre que el metano tiene una vida media en la atmósfera de corta duración (unos 12 años), por lo que su potencial de calentamiento depende mucho del tiempo que haya transcurrido desde su emisión.

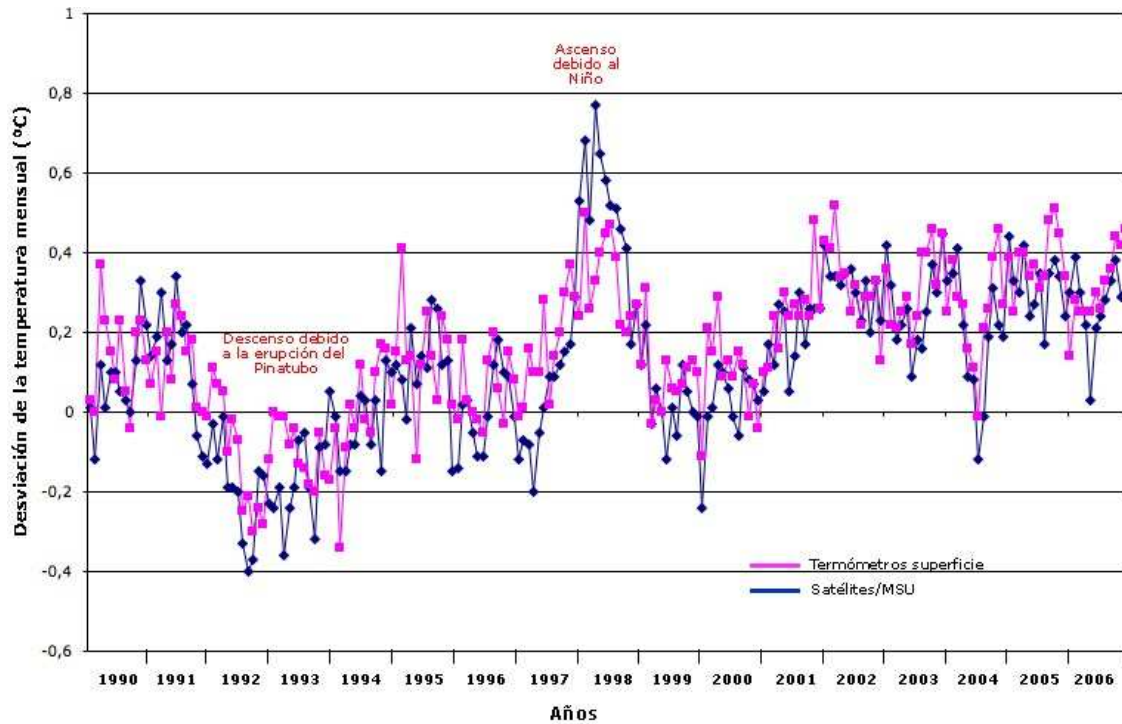
Otros aspectos aún más complicados no fueron recogidos en el Protocolo, como es el de las reacciones entre sí, directas o indirectas, de los diversos gases invernadero en la atmósfera, que hacen variar de forma muy compleja sus vidas medias y, por lo tanto, su potencial de calentamiento.

Conclusión

Finalmente, no se ha establecido todavía ninguna forma de control internacional de las emisiones nacionales, con lo que su ejecución se hace todavía más dudosa.

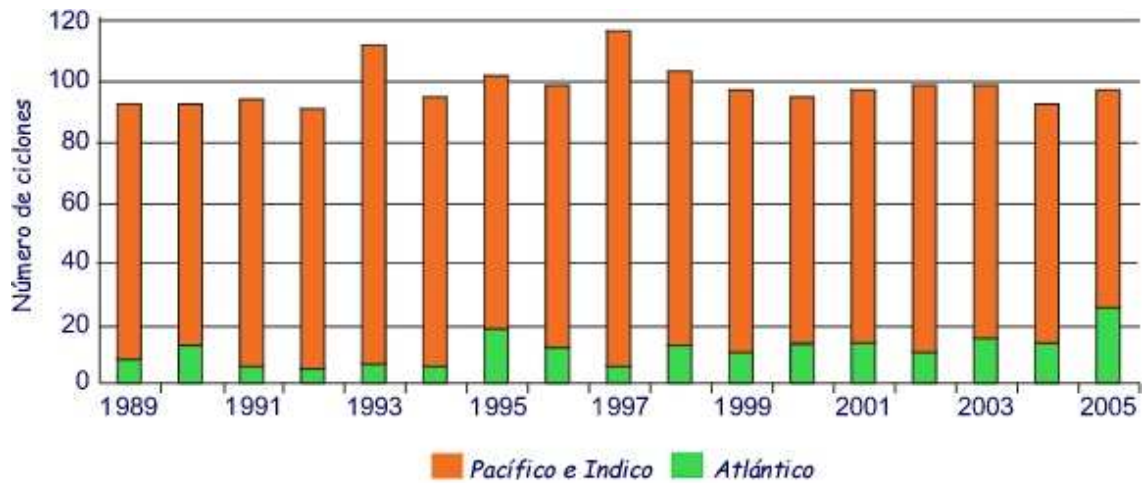
En Kioto se alcanzó un principio de tratado muy complejo, útil para muchos como slogan político, pero muy vago y nada pragmático y en el que muy pocos países salen perjudicados.

Y quizás lo más paradójico es que, pese al barullo, la temperatura media global en los últimos 17 años ha subido muy poco y de forma irregular.



Evolución de la temperatura media global en superficie medida con termómetros (línea morada) y en la baja troposfera medida por satélites (línea azul) desde Enero 1990 hasta Diciembre 2006. Se representan las diferencias de las temperaturas mensuales con respecto a las medias mensuales del período común 1979-1998 (sólo existen mediciones satelitales desde 1979). Se observa una gran similitud entre las dos gráficas. Lo más notable es el descenso térmico ocurrido tras la erupción del volcán Pinatubo, en Junio de 1991, (mínimo en Agosto de 1992) y el ascenso de la temperatura media global durante El Niño de 1997-98 (máximo en Abril de 1998).

Tampoco las alarmas continuas del aumento de fenómenos locales extremos como inundaciones o ciclones tropicales parecen significar que se esté produciendo un cambio climático anormal en la historia del clima. Véase, por ejemplo, que en 2005, año del Katrina, los ciclones tropicales a nivel global no fueron más frecuentes de lo normal. Como globalmente el calentamiento es muy lento y falta de peligro, se echa mano de acontecimientos locales raros y extremos, y la globalización de la información y el catastrofismo de los medios permiten mantener el espejismo de que ahora ocurren con mayor frecuencia que antes.



Número anual de ciclones tropicales en el conjunto de los océanos. Su frecuencia total no ha sufrido modificaciones a lo largo de los últimos años, a pesar de la alarma creada por los ciclones ocurridos en el Atlántico en 2005.

Referencias:

<http://www.giss.nasa.gov/data/update/gistemp/>

<http://vortex.nsstc.uah.edu/data/msu/t2lt/uahncdc.lt>

<http://www.meteo.fr/temps/domtom/antilles/pack-public/cyclone/saison2005/Saiso-cycle-bilan-synth-AG.htm>

<http://www.eia.doe.gov/emeu/international/carbondioxide.html>

Efecto invernadero y calentamiento global: 3 conceptos erróneos

(Colección de textos originales de Pedro Gómez-Estéban González, ligeramente modificados)

1er CONCEPTO ERRÓNEO

El efecto invernadero se llama así porque se basa en el mismo principio físico que los invernaderos contruidos por el ser humano — la opacidad de algunas sustancias a la radiación infrarroja.

No. Sólo que sucede lo mismo, que aumenta la temperatura en su interior, pero no por la misma razón.

La explicación **errónea** acerca de cómo funciona un invernadero es la siguiente: *“El invernadero está cubierto en su mayor parte de vidrio o plástico que es transparente a la radiación visible, pero opaco a la radiación infrarroja. Por lo tanto, la luz del Sol puede penetrar por los cristales del invernadero y calentar lo que hay dentro, pero la radiación infrarroja emitida por el interior caliente no puede escapar por el vidrio, de modo que el interior alcanza temperaturas bastante elevadas.”*



Invernadero: Cálido, pero no por lo que mucha gente piensa.

De hecho, se suele emplear casi exactamente el mismo razonamiento para explicar por qué el interior de los coches se calienta en verano: *“las ventanas del coche son transparentes a la radiación visible pero opacas al infrarrojo, de modo que “atrapan” el calor dentro del coche”*.

Esta explicación es incorrecta. Existen varios fenómenos físicos diferentes involucrados en el aumento de temperatura dentro de un invernadero o un coche, pero el responsable fundamental tanto en uno como en otro no es la opacidad de nada a ninguna radiación (aunque sí sea cierto que el vidrio es opaco al infrarrojo lejano), sino la ausencia de un fenómeno completamente diferente: **la convección**.

El funcionamiento de la convección es bastante simple: como probablemente sabes, cuando un fluido está caliente se expande y su densidad disminuye y al revés. Esto es lo que hace que el aire frío descienda y el aire caliente ascienda, por ejemplo — y es la base del funcionamiento de los globos aerostáticos que calientan el aire de su interior con vistosas llamaradas. Lo mismo sucede con el agua dentro de una olla o el magma en el interior de la Tierra. Mediante la convección se transmite energía térmica por un fluido debido al movimiento del propio fluido.

De los tres mecanismos de transmisión del calor —conducción, convección y radiación— la convección es, de lejos, el más rápido y eficaz en la vida cotidiana. Cuando calientas algo en el interior de un fluido, *prácticamente toda la pérdida térmica que se produce es debida a la convección*: el objeto calienta el fluido a su alrededor, de modo que éste se vuelve menos denso y asciende, llevándose consigo el calor desprendido por el objeto. El espacio que rodea al objeto es llenado entonces por el fluido cercano que está más frío, pero el objeto lo calienta, de modo que el fluido pesa menos y asciende para ser reemplazado por otra “remesa” de fluido frío, etc.

La convección hace que ese objeto caliente esté rodeado siempre de una masa de fluido más frío que él, de modo que la pérdida térmica es muchísimo más rápida de lo que sería si el fluido no se moviera — si no hubiera convección. Aunque no seamos siempre conscientes de por qué hacemos las cosas, éste es el funcionamiento básico de un jersey, una manta... *o un invernadero*.

Efectivamente, cualquiera de estos inventos evita en gran medida la pérdida térmica porque atrapa el aire, impidiendo que ascienda y sea reemplazado por aire nuevo. Cuando se introduce en ellos algo caliente, ese algo calienta el aire que hay atrapado ahí dentro y una vez que eso ocurre se reduce muchísimo la pérdida de temperatura del objeto, puesto que la diferencia de temperatura con lo que lo rodea (el aire que ha calentado) es minúscula. Desde luego, sigue perdiéndose energía porque las paredes del recipiente se calientan y emiten radiación, pero es algo muchísimo más lento, como has comprobado en invierno cuando duermes tan a gusto envuelto en una manta.

¿Cuál es entonces la explicación correcta del funcionamiento de un invernadero?

Las ventanas del invernadero son, efectivamente, transparentes a la radiación visible procedente del Sol, que calienta los objetos que hay dentro, como la tierra y las propias plantas. Estos objetos calientan el aire que hay dentro del invernadero y la radiación infrarroja emitida es absorbida por los cristales, pero la pérdida térmica evitada de este modo es muy pequeña. El aire caliente del interior del invernadero disminuye su densidad y trata de escapar ascendiendo, pero no puede debido a las paredes, con lo que tampoco es reemplazado por aire nuevo más frío.

La cantidad de calor que se perdería en forma de radiación infrarroja es mucho más pequeña que la que se perdería cuando el aire escapase, de modo que decir que esa

opacidad de las paredes a la radiación infrarroja es la razón del aumento de temperatura es absolutamente engañoso — lo que mantiene el calor dentro del invernadero es la “opacidad” de los cristales al aire, que se llevaría más calor en un minuto que la radiación infrarroja en horas.

Los científicos, que son curiosos por naturaleza, han realizado diversos experimentos para verificar qué fenómeno es el responsable fundamental de que el calor no escape del invernadero.

Uno muy sencillo es abrir un agujero en la ventana del invernadero, o bien en el techo o bien cerca del suelo, exactamente del mismo tamaño. Si el agujero está cerca del suelo, la temperatura del interior del invernadero desciende ligeramente pero el invernadero funciona bastante bien: de hecho, algunos invernaderos ni siquiera están cerrados por debajo, sino que son “gorros” que evitan que el aire caliente ascienda. *Pero si el agujero está en el techo, la temperatura desciende muy bruscamente y el invernadero deja de ser útil*, pues se pierde calor muy rápidamente no por radiación, sino porque todo el aire caliente está escapándose por esa “chimenea” y llevándose consigo la energía térmica.

Otro experimento más curioso fue realizado por R. W. Wood y publicado en el *Philosophical Magazine* británico en 1909. Wood sospechaba que la explicación errónea que he mencionado arriba era efectivamente falsa, y que el calentamiento del invernadero se debía a la ausencia de convección, aunque muchos de sus contemporáneos creían que la responsable era la opacidad del vidrio a la radiación infrarroja. Para comprobarlo, construyó dos pequeños invernaderos, uno cubierto por una ventana de vidrio (opaco a la radiación infrarroja de onda larga), y otro cubierto por una ventana de sal de roca (transparente a la radiación infrarroja de onda larga). De este modo, su invernadero de sal cristalina no presentaba en absoluto opacidad a la radiación infrarroja procedente del interior. Las conclusiones de Wood fueron claras:

Había ahora una diferencia escasa de un grado entre las temperaturas de los dos recipientes. La temperatura máxima alcanzada fue de 55 °C. Por lo que sabemos de la distribución de energía en el espectro de radiación emitida por un cuerpo a 55 °C, está claro que la lámina de sal de roca puede transmitir prácticamente toda, mientras que la de vidrio la absorbe completamente. Esto nos muestra que la pérdida de temperatura del suelo por radiación es muy pequeña comparada con la pérdida por convección; en otras palabras, conseguimos muy poco por el hecho de que la radiación sea bloqueada.

Desgraciadamente, la idea de que los invernaderos funcionaban bloqueando la radiación infrarroja estaba muy extendida, y el nombre del mal llamado *efecto invernadero* es la consecuencia de esto. Todavía se explica muy a menudo a los escolares con diagramas que muestran “cristales” en la atmósfera y rayos infrarrojos que suben desde el suelo, rebotan y vuelven a caer al suelo, y esto en libros de 2008.

Por tanto, el efecto invernadero atmosférico no se debe a que la radiación infrarroja “rebote” en la atmósfera. La atmósfera recibe energía térmica de diversas maneras y fuentes: algunos de sus gases absorben parte de la radiación que nos llega del Sol, y parte de la radiación infrarroja que emite el suelo. Las capas altas de la troposfera también se calientan por convección, al ascender masas de aire caliente que han absorbido calor del suelo. Como consecuencia de todo esto, la atmósfera tiene una temperatura determinada — que depende de la altitud.

Cualquier cuerpo que está a una temperatura superior al cero absoluto emite radiación (tanta más cuanto más caliente esté), luego la atmósfera emite radiación infrarroja hacia la Tierra y el espacio. Puesto que la Tierra está rodeada por la atmósfera, recibe continuamente energía térmica de ésta, de igual modo que ella la emite. De hecho, de las dos fuentes de energía térmica directa más importantes del suelo (el Sol y la atmósfera), la Tierra recibe bastante más energía de la atmósfera que del Sol, aunque en último término casi toda la energía que nos pasamos el uno al otro tiene su origen en la estrella, por supuesto.

De modo que el efecto invernadero se debe simplemente a que, al estar rodeados por una masa de gas que tiene una temperatura no nula, recibimos más radiación de la que recibiríamos si esa masa de gas no estuviera ahí. *Pero ni la temperatura que tiene el gas se debe únicamente a la radiación que absorbe procedente de la Tierra, ni la radiación infrarroja del suelo “rebota” en ninguna parte, ni tiene nada de esto que ver con el funcionamiento de los invernaderos que construimos los humanos.*

2º CONCEPTO ERRÓNEO

La segunda afirmación errónea sobre el efecto invernadero es la siguiente: **El efecto invernadero es lo mismo que el calentamiento global, es decir, el hecho de que la temperatura media de la Tierra haya aumentado durante las últimas décadas y tal vez siga haciéndolo en el futuro.** Como consecuencia de esta falsa idea, suele añadirse a menudo (explícita o implícitamente) una segunda: **El efecto invernadero es malo.**

Absurdo.

Sucede que mucha gente no conoce la diferencia — sobre todo si su principal fuente de información son los medios de comunicación tradicionales — entre los conceptos de *efecto invernadero* y *calentamiento global*, algunos de los cuales utilizan ambos términos indistintamente.

Dicho esto, recordemos brevemente en qué consiste el *efecto invernadero*: *cuando un planeta tiene atmósfera, la temperatura sobre su superficie es mayor de lo que sería si la atmósfera no existiera, puesto que los gases emiten radiación que calienta la superficie.* Es, como siempre, una explicación muy simple, pero debería valer de sobra para que veas por qué la afirmación de arriba es absurda.

Por otro lado, ¿qué es el llamado *calentamiento global*? Dicho rápido y mal, *es la idea de que la temperatura media de la Tierra ha ido aumentando en las últimas décadas y, según algunos modelos, probablemente seguirá haciéndolo en el futuro.* No voy a entrar aquí a valorar esos modelos, ni si el calentamiento global es *antropogénico* (originado por el ser humano) o no — el objetivo de este artículo es explicar la diferencia entre ambos conceptos.

No hay más que leer ambas (burdas) definiciones para ver que una cosa y la otra son bien distintas, pero analicemos a continuación algunas de las diferencias más importantes.

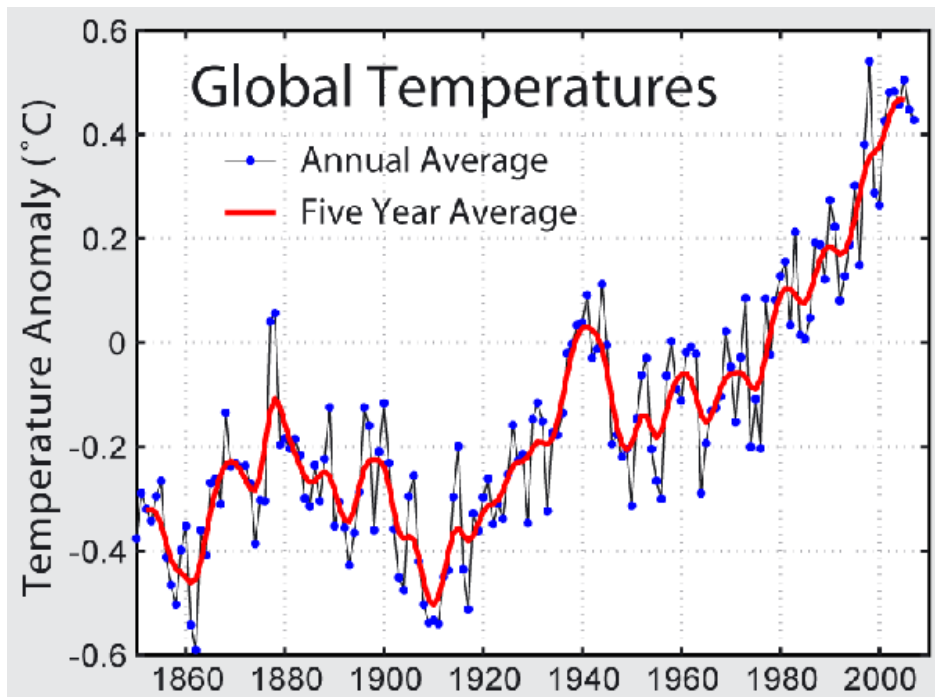


Gráfico de la anomalía térmica anual. Aumente o disminuya la temperatura, hay efecto invernadero. Crédito: [Wikipedia/GPL](#).

Por su propia definición, *el efecto invernadero aparece en cualquier planeta con atmósfera desde el mismo momento en el que se forma la atmósfera*. El efecto invernadero en la Tierra ha existido prácticamente desde la formación de nuestro planeta: de hecho, en algunos momentos del *Hadeico* (período de formación de la Tierra) la atmósfera fue unas 250 veces más densa que ahora, con concentraciones mucho mayores de algunos gases responsables del efecto invernadero, con lo que este efecto era entonces muchísimo más intenso que ahora mismo. Pero el caso es que, **si hay atmósfera, hay efecto invernadero**.

El calentamiento global, por el contrario, es algo que se refiere a la evolución de la temperatura sobre la superficie en las últimas décadas de nuestra historia; dependiendo de la fuente la fecha inicial varía, pero suele definirse a partir de los inicios del siglo XX. El calentamiento global es, por lo tanto, un concepto referido a la variación de la temperatura en los últimos 100 años. *El efecto invernadero lleva existiendo en la Tierra desde hace casi 4.200 millones de años*.

En segundo lugar, el concepto de efecto invernadero no involucra un aumento gradual de temperatura. *¿Que la temperatura aumenta?* Hay efecto invernadero. *¿Que disminuye?* Hay efecto invernadero. *¿Que se mantiene constante?* Pues hay efecto invernadero, pues lleva existiendo desde que tenemos atmósfera. Por el contrario, **el calentamiento global sólo existe si la temperatura aumenta**: el concepto es precisamente ese cambio de temperatura.

Ni siquiera vale justificar la confusión diciendo *“Bueno, pero si aumenta el efecto invernadero hay calentamiento global”*. Para empezar, puede haber calentamiento global sin que aumente el efecto invernadero (por ejemplo, si aumenta la actividad solar); además, que el aumento de una cosa produzca la aparición de otra no implica, ni muchísimo menos, que ambas sean la misma.

En tercer lugar, existe una discusión bastante encendida políticamente acerca de si el calentamiento global es antropogénico o no; sin embargo, **esto no tiene ningún sentido al hablar del efecto invernadero**: este efecto lleva existiendo miles de millones de años sin el ser humano, y si mañana desaparecemos seguirá existiendo, lo mismo que existe, por ejemplo, en Venus.

Esto es algo que se oye a menudo y que, aunque sea simplemente una de las diferencias entre ambos conceptos, quiero recalcar aunque sea repetitivo: *el efecto invernadero no es un fenómeno producido por el ser humano*, sino que existe en cualquier planeta con atmósfera. Cuando modificamos la composición de la atmósfera emitiendo o absorbiendo gases, podemos *modificar* la intensidad del efecto invernadero; si la aumentamos, se habla del *efecto invernadero inducido*, pero el efecto invernadero existe independientemente de que haya intervención humana o no.

Quizá lo peor es oír (o simplemente que se sugiera) en la televisión o en los periódicos que la propia existencia del efecto invernadero es perjudicial. Dicho muy burdamente, que *el efecto invernadero es malo* (malo para nosotros). Nada más lejos de la realidad — *el efecto invernadero no sólo no es malo para nosotros, sino que sin él estaríamos probablemente muertos*, o mejor nunca habríamos tenido que preocuparnos por él porque no habríamos existido.

La Tierra tiene atmósfera (afortunadamente para nosotros) y, por lo tanto, está bajo la acción del efecto invernadero. Por si te lo estás preguntando, los modelos radiativos con la composición y densidad de la atmósfera actual muestran que **la temperatura media de la superficie de la Tierra, si no existiera el efecto invernadero, sería de unos -19°C en vez de los 14°C reales**. Es decir, si no hubiera atmósfera la superficie de la Tierra estaría unos 33°C más fría de lo que está en la realidad.

Evidentemente, si no hubiera atmósfera no tendríamos tiempo para preocuparnos por el frío que pasaríamos porque estaríamos demasiado ocupados intentando respirar; pero si la presencia de una atmósfera no supusiera la existencia del efecto invernadero y estuviéramos a una temperatura media de -19°C , la evolución de la vida sobre la Tierra hubiera sido probablemente bien distinta de lo que fue. De lo que no cabe duda es de que nuestra sociedad, como es ahora mismo, no podría existir. Un cambio de temperatura así ahora significaría una catástrofe para nosotros de proporciones inimaginables.

Algo parecido hubiera sucedido si, por alguna razón, el efecto invernadero fuese el doble de intenso de lo que es realmente: si la diferencia de temperatura media fuera de 66°C en vez de 33°C , la temperatura media de la superficie terrestre sería de 47°C . Al igual que antes, si esto hubiera sido así siempre nuestra especie probablemente no sería como es (o ni siquiera existiría), y si un cambio así se produjese ahora mismo las consecuencias serían terribles.

Ni siquiera hace falta llegar a casos tan extremos: un aumento o una disminución de la intensidad del efecto invernadero que produjese una variación relativamente brusca de 5°C hacia arriba o hacia abajo de la temperatura media global tendría consecuencias de envergadura para nuestra sociedad: y no sólo para ella, puesto que criaturas como los adorables ositos polares de la foto probablemente se extinguirían.



Jóvenes lectores de este texto si no existiera el efecto invernadero.

Naturalmente, lo que más nos preocupa actualmente es *la posibilidad de que las actividades humanas estén aumentando la intensidad del efecto invernadero*, en cuyo caso este aumento podría estar provocando un calentamiento global. Pero esto no quiere decir que el efecto invernadero sea malo, sino que **demasiado efecto invernadero es malo, lo mismo que demasiado poco efecto invernadero es malo**; y, por supuesto, la ausencia de efecto invernadero no sería mala, sino malísima, para nosotros.

3er CONCEPTO ERRÓNEO

El tercer concepto erróneo es sobre los gases responsables del efecto invernadero: **el principal gas responsable del efecto invernadero es el dióxido de carbono (CO₂)**.

Desde luego que no.

Parte del problema es la confusión que ya mencionamos en el artículo anterior entre *efecto invernadero* y *calentamiento global*, aunque hay otros responsables (como la idea de que el efecto invernadero es causado en su mayor parte por el hombre). De lo que no me caben muchas dudas, tras ver la televisión y leer algunos periódicos, además de ver entrevistas a gente en la calle y cosas así, es de que si preguntas a alguien “*¿cuál es el principal gas causante del efecto invernadero?*” la respuesta va a ser, más frecuentemente que cualquier otra, “*el dióxido de carbono*” (una de las respuestas recibidas ha sido “*el ozono*”, que es también incorrecta).



La atmósfera terrestre. [Versión a 3027×2010 px](#). Crédito: NASA.

Peor aún, en muchas publicaciones que deberían dar mejor ejemplo se muestran gráficas o tablas con títulos como “*Gases de efecto invernadero*”, sin mayor aclaración, en las que aparece como estrella principal el CO₂, mientras que el principal responsable *de verdad* a veces ni siquiera tiene un lugar, o incluso se dice explícitamente que el dióxido de carbono es el principal gas de efecto invernadero.

También es cierto que en otros lugares se especifica muy bien a qué se refieren (como verás al final, la Wikipedia es muy pulcra en este aspecto y menciona esta confusión explícitamente)... pero la mayor parte de nosotros nos enteramos de todo lo relacionado con este asunto en periódicos y televisión, y ellos a menudo no son tan correctos.

Antes de nada, ni qué decir tiene que todos los gases presentes en la atmósfera contribuyen al efecto invernadero de una forma u otra: como dijimos al describir por primera vez el efecto y su desafortunado nombre, el hecho de que la atmósfera tenga una temperatura basta para calentar la Tierra. Cada molécula de gas contribuye al efecto... *pero no todas igual, ni mucho menos*.

Por ejemplo, las *moléculas monoatómicas* (de un solo átomo, como las del argón y otros gases nobles) y las *moléculas diatómicas homonucleares* (de dos átomos iguales, como el O₂ y el N₂) apenas absorben radiación infrarroja, de manera que contribuyen poco al efecto invernadero. La razón es que cuando los átomos de estas moléculas vibran, no cambia el [momento dipolar eléctrico](#) de la molécula: dicho mal y pronto, si los átomos de la molécula cambian levemente la distancia entre ellos o sus posiciones relativas, la “simetría eléctrica” de la molécula no cambia. Esto le sucede precisamente a los componentes mayoritarios de la atmósfera: oxígeno, nitrógeno y argón. Las principales responsables de la absorción IR son las moléculas más complejas, con átomos de varios

elementos, que constituyen únicamente alrededor del 1% de la masa atmosférica y que *sí* modifican su momento dipolar cuando sus átomos vibran.

Por ejemplo, el [*hexafluoruro de azufre*](#) (SF_6) es capaz de absorber y emitir radiación infrarroja de una forma extraordinariamente eficaz, de modo que, a igualdad de moléculas, contribuiría más que cualquier otra sustancia de nuestra atmósfera al efecto invernadero. Afortunadamente para nosotros, este gas sólo existe en cantidades minúsculas en la atmósfera o las cosas serían bien distintas a cómo son.

Porque, naturalmente, lo que hace a un gas contribuir más o menos de forma neta al efecto invernadero no es sólo la estructura de sus moléculas: influye además, de forma sustancial, *la cantidad de moléculas del gas presentes en la atmósfera*. De ahí que el SF_6 tenga una contribución ínfima al efecto invernadero a pesar de ser tan eficaz molécula a molécula.

Al tener en cuenta tanto la eficacia de absorción/emisión de cada molécula como la cantidad de cada gas presente en la atmósfera, podemos estimar la contribución neta de la cantidad total de un gas al efecto invernadero. Es difícil calcularla con precisión, porque los efectos de cada gas se solapan hasta cierto punto, las cantidades de unos de ellas afectan a las de los otros y, en general, porque el sistema atmosférico es de una complejidad apabullante: si no, no se hablaría tanto sobre lo que está pasando y cómo va a evolucionar el sistema en el futuro. Pero sí tenemos al menos una idea aproximada de cuánto influye cada una en el efecto invernadero.

Por ejemplo, aunque el ozono (O_3) sí contribuye de forma mensurable al efecto invernadero, **sólo es responsable de entre el 3% y el 7%**. Puesto que estamos hablando en términos generales, permitid que se haga una burda aproximación para poder comparar unos gases con otros y digamos que la contribución del ozono es de alrededor del 5%.

El metano (CH_4) es otro contribuyente considerable, más aún que el ozono: **entre un 4% y un 9% se debe al metano**, es decir –una vez más, realizando una media simplificada–, alrededor del 6,5%.

A pesar de que cada molécula de metano es mucho más eficaz como generadora de efecto invernadero que las de CO_2 , la cantidad de dióxido de carbono presente en la atmósfera es *más de doscientas veces la de metano* en volumen, de modo que el CO_2 es mucho más significativo que el metano como responsable de este efecto: **entre el 9% y el 26%**; es decir, en nuestros términos comparativos, de un 17,5%, lo que vendría a ser casi tres veces la contribución del metano.

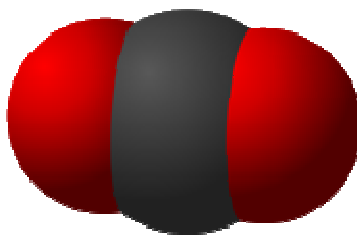


Diagrama de una molécula de CO_2 . Crédito: [Wikipedia/GPL](#).

Pero todos estos gases se quedan atrás cuando comparamos sus contribuciones con las del rey del efecto invernadero: *la humilde molécula de H₂O*. Efectivamente, **el vapor de agua es el principal responsable del efecto invernadero**, con entre un 36% y un 70% de contribución — la media entre los dos valores es de un 53%. Así pues, el vapor de agua puede contribuir más al efecto invernadero que todos los demás gases juntos; y, cualquiera que sea el valor estimado, es el responsable número uno de forma clara.

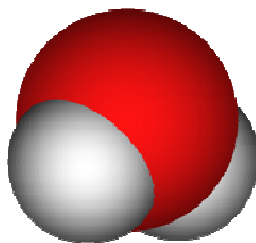


Diagrama de una molécula de H₂O. Imagen de dominio público.

Aparte de tener un momento dipolar considerable y ser capaz de absorber radiación infrarroja de forma eficaz (aunque no tan eficaz como el CO₂, molécula por molécula, igual que éste no puede compararse al SF₆), la principal razón es la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera, *más de diez veces* la del dióxido de carbono.

¿Por qué entonces siempre aparece el CO₂ en las gráficas, en los artículos de los periódicos y en la televisión? Quizá sea que esos medios, a pesar de que no lo suelen decir explícitamente, no están hablando del efecto invernadero sin más: lo hacen del *efecto invernadero antropogénico*, es decir, la parte del efecto invernadero debida a gases emitidos por el ser humano. Al restringirnos a los gases emitidos directamente por la actividad humana, el dióxido de carbono sí se convierte en la estrella principal.

De ahí que, cuando se discute acerca del efecto invernadero antropogénico, nos centremos en nuestras emisiones de CO₂, puesto que es nuestra principal manera de modificar la temperatura media atmosférica, pero no porque sea la mayor influencia neta sobre la temperatura media atmosférica.

Para empezar, el hecho de que nosotros no modifiquemos de forma considerable la cantidad de H₂O de la atmósfera **directamente** no quiere decir que no lo hagamos **indirectamente**, y de una forma potencialmente peligrosa. Como es probable que sepas, la cantidad de vapor de agua que puede contener el aire depende de varios factores, y uno de ellos es la temperatura: cuanto más caliente está el aire, más vapor de agua puede contener antes de que parte de él se condense. Por eso, por ejemplo, cuando una masa de aire húmedo asciende y se enfría se produce una nube.

De modo que supongamos que nos ponemos, por ejemplo, a emitir SF₆ e ignoramos completamente el vapor de agua porque no existe la menor relación química entre estos dos gases, y nosotros no estamos emitiendo cantidades apreciables de H₂O. Pero nuestro SF₆ aumenta ligeramente la temperatura de la atmósfera (de una manera tremenda comparativamente con su masa)... *y al calentarse la atmósfera, puede contener más vapor de agua*. Como resultado, se evapora agua que antes era líquida —por ejemplo, de los océanos— y la concentración de H₂O en la atmósfera aumenta.

Pero, como he dicho, el vapor de agua es un contribuyente muy importante del efecto invernadero: al aumentar esa concentración, aumenta la intensidad del efecto invernadero y la atmósfera se calienta un poco más. ¡Ah! Pero al calentarse, puede contener más vapor de agua... pero entonces, se evapora más agua y aumenta la concentración de H₂O. *Pero entonces...*

Antes de que pienses que esto es un bucle sin retorno que lleva a la evaporación de toda el agua de la Tierra, recuerda lo que he dicho al empezar a hablar de las contribuciones relativas de cada gas: la atmósfera es un sistema de una complejidad tremenda, y las cosas no son tan sencillas. Por ejemplo, es posible que al aumentar la concentración de vapor de agua en la atmósfera la cubierta de nubes también aumente, con lo que el albedo de la Tierra se incremente (refleje más luz solar que antes), de modo que la temperatura disminuya... o puede que no. Puede que no lo haga de forma neta pero aumente la violencia de algunos fenómenos meteorológicos, o el clima de determinadas zonas, o que la temperatura oscile en ciclos. No lo sabemos: pero lo que sí sabemos (aunque no se mencione en las noticias) es que *ignorar el principal responsable de un efecto físico al estudiar un sistema es un error gravísimo*.

De modo que devolvamos el H₂O a su bien merecido trono de *rey del efecto invernadero*, mientras sentamos al CO₂ en un sillón más pequeño de *vizconde del efecto invernadero antropogénico*. Si las palabras “efecto invernadero” no hacen aparecer en nuestra mente “vapor de agua” antes que cualquier otra cosa, merecemos un sonoro golpe en el cráneo por parte del cetro del H₂O.

TEMA 3 – EFECTO INVERNADERO Y EFECTO INVERNADERO INTENSIFICADO

¿Cuál es el principal problema del llamado efecto invernadero intensificado probablemente conducente a un fenómeno de calentamiento global?

1. Que aún no se conoce ni su extensión, ni su alcance, ni parte de sus posibles consecuencias.
2. Que parece conducir a procesos de *retroalimentación positiva*, lo que supone que el aumento de temperatura conduce a un aumento todavía mayor.
3. Las consecuencias en el peor de los *escenarios* pueden ser catastróficas.

Mecanismo del efecto invernadero

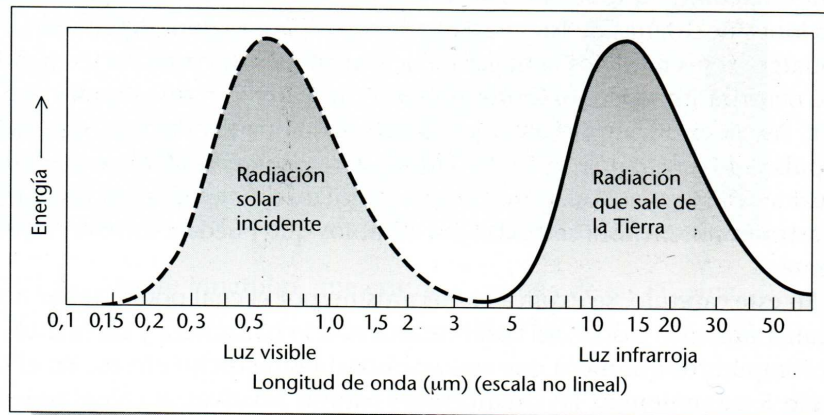
La superficie y la atmósfera de la Tierra se mantienen calientes gracias a la energía del sol. De hecho, de todo el espectro de radiación recibido, algo más de la mitad es radiación IR, que es la responsable directa del calentamiento de los cuerpos al hacer vibrar los átomos enlazados en las moléculas. Se dice entonces que existe una absorción de radiación IR. La luz visible, más energética, que recibimos es la mayor parte del resto de la energía del sol, y es responsable de los tránsitos electrónicos internos en las moléculas. El ojo humano está adaptado a percibir este tipo de longitudes de onda como diferentes colores. Por otro lado, una pequeña fracción es luz UV, que tiene la suficiente energía como para que los tránsitos electrónicos sean mayores, pudiendo generar en último término la ruptura de los enlaces en las moléculas.



Radiación solar incidente

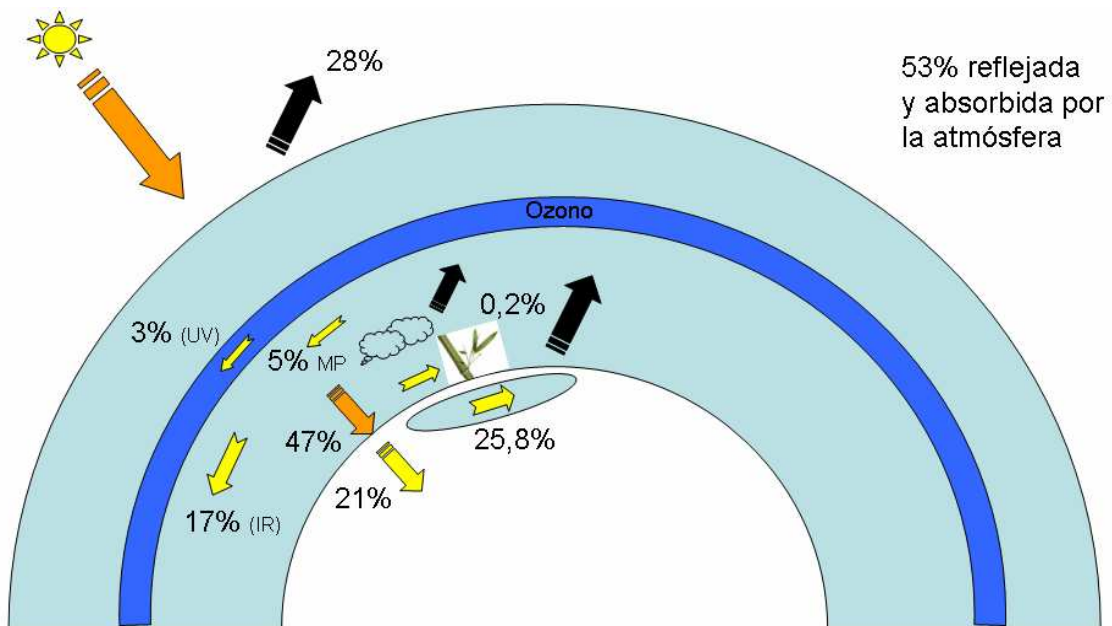
Del total de la radiación incidente, un 20% es absorbida por los gases de la atmósfera: el UV por el ozono estratosférico y el oxígeno molecular (3%), y el IR por el CO₂ y el H₂O (17%), principalmente (éstos, en un 90% con respecto al resto de moléculas). Un 5% del resto de la radiación incidente es absorbida por el total de materia particulada atmosférica (polvo, polen, hollines, contaminantes, etc). Un 28% es reflejada por las nubes, hielo, nieve, arena, piedras, etc y regresa al espacio, de forma que sólo llega a la superficie terrestre un 47% del total (o sea, más o menos la mitad). De este 47%, un 25,8% es absorbido por el agua de los océanos, un 21% por el suelo y sólo un 0,2% por las plantas.

Adicionalmente, la Tierra también emite energía, como cualquier otro cuerpo caliente, en forma de radiación IR. Y además mucha energía porque si no hubiera un equilibrio entre la energía recibida por el sol y la emitida por la Tierra, la Tierra estaría permanentemente calentándose y eso no sucede. No obstante, no toda esta radiación escapa al espacio ya que la presencia de atmósfera hace que algunos gases puedan absorber parte de esta energía, la cual es luego reemitida en todas las direcciones, volviendo, parte de ella, a la superficie terrestre. La región de la radiación IR emitida por la propia Tierra está en el rango del llamado IR térmico, y no todos los gases de la atmósfera son capaces de absorber este tipo de radiación.



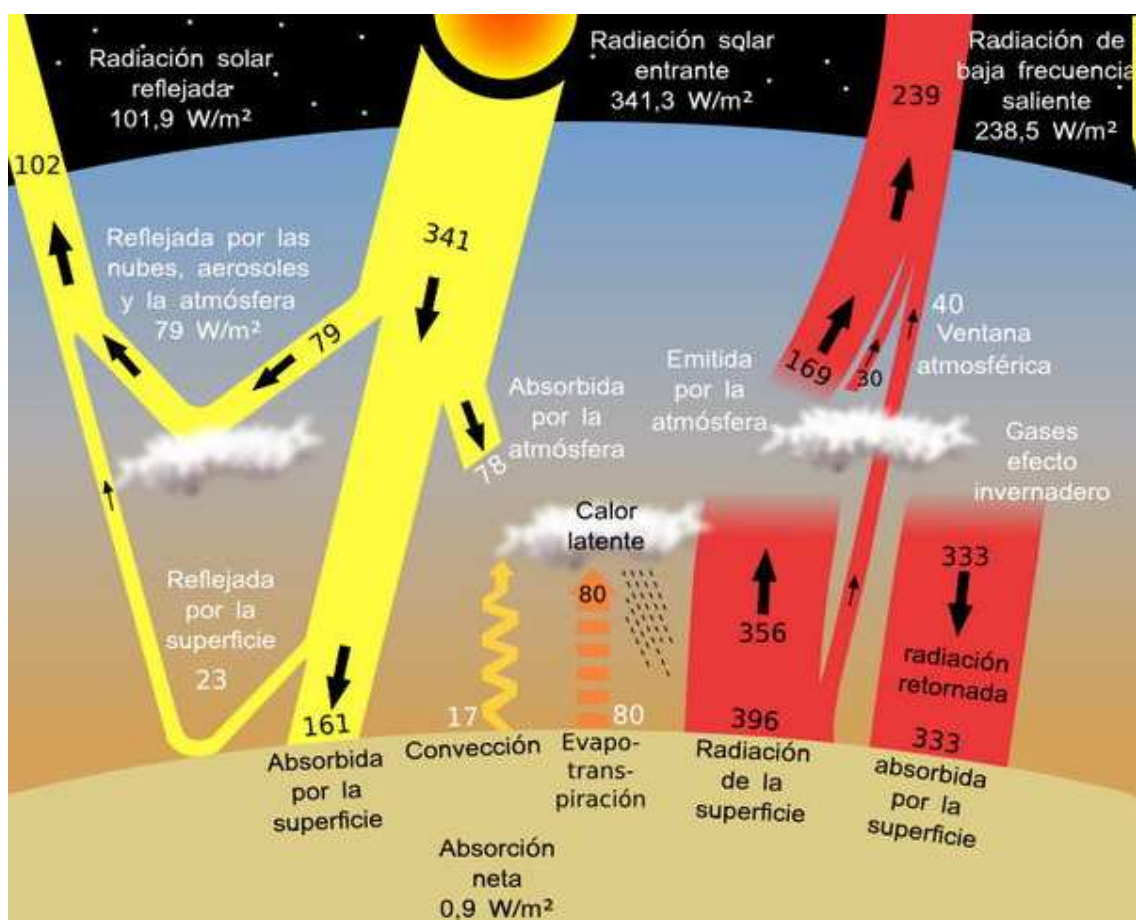
Esquema radiativo Sol/Tierra

Este equilibrio térmico entre una superficie planetaria y su atmósfera mantenido por fuentes de calor (como puede ser una estrella cercana y/o el propio planeta) se denomina efecto invernadero, y hace que, en particular, la superficie terrestre tenga una temperatura media de unos 15 °C en lugar de entre -15 °C y -20 °C, que es la que le correspondería de no existir una atmósfera en la Tierra. De ser así, nuestro planeta estaría cubierto por una gruesa capa de hielo perpetuo.



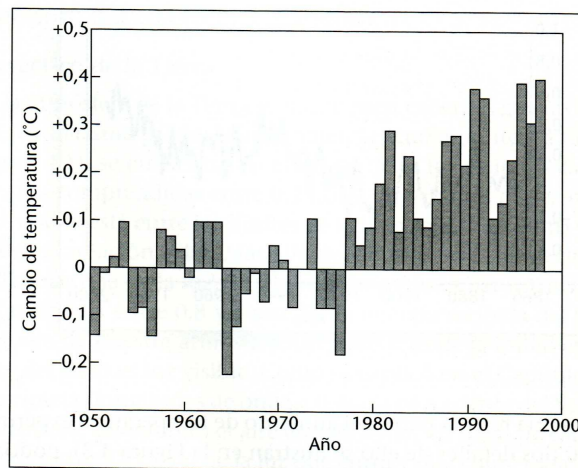
Balance energético de la Tierra

Usualmente, el balance energético se presenta en W/m^2 , observándose que existe un balance positivo que corresponde a una absorción neta de $0.9 W/m^2$ por parte de la Tierra. Este forzamiento radiativo sería el responsable del aumento de temperatura media terrestre (forzamiento radiativo: al cambio en el flujo neto de energía radiativa hacia la superficie de la Tierra, medido en el borde superior de la troposfera (a unos 12.000 m sobre el nivel del mar), como resultado de cambios internos en la composición de la atmósfera, o cambios en el aporte externo de energía solar, y se expresa en W/m^2 . Un forzamiento radiativo positivo contribuye a calentar la superficie de la Tierra, mientras que uno negativo favorece su enfriamiento), y cada gas invernadero contribuye con un valor particular de forzamiento radiativo, tanto mayor cuanto mayor sea su contribución.



Otra visualización del balance energético

El problema que preocupa a los científicos ambientales es que el aumento de la concentración de gases que absorben IR en la atmósfera podría originar un aumento de la temperatura media de la superficie terrestre en lo que se denominaría un **efecto invernadero intensificado**, para distinguirlo del efecto que ha operado siempre en la Tierra desde que tiene una atmósfera. En los últimos 100 años se ha experimentado un pequeño aumento de la temperatura media terrestre (alrededor de medio grado). Un tercio de este aumento puede explicarse por la mayor actividad solar registrada desde entonces, actividad que parece sigue en aumento por las tendencias observadas. Esto lleva a pensar que la temperatura media de la Tierra deberá de seguir aumentando paulatinamente.



Variación de la temperatura media de la Tierra (referencia de 14 °C para el período 1950-1981)

Los principales constituyentes de la atmósfera, O₂, N₂ y Ar, no absorben IR por lo que no son responsables del efecto invernadero. Los responsables más importantes son el agua (que contribuye casi con dos tercios del total) y el dióxido de carbono (que contribuye en una cuarta parte más o menos). Juntos, suponen el 90% del total del efecto invernadero.

¿Por qué una molécula absorbe energía? Una molécula absorbe energía cuando la longitud de onda de la radiación incidente estimula algún proceso físico-cuántico para el cual se requiere precisamente esa energía, poniéndolo en 'funcionamiento'. Por ejemplo, la rotación molecular (que como fenómeno atómico-molecular está también cuantizada) está en el rango de la radiación de microondas. Dicho de otro modo, una molécula gira un número de veces aproximado a la frecuencia ondulatoria de la radiación de microondas. Esto hace que, cuando se irradia una molécula con microondas, esta pueda pasar a un estado cuántico (o sea, que no puede tener cualquier valor de energía, ya que los diferentes niveles rotacionales están cuantizados) de energía rotacional superior haciéndola girar más deprisa, por lo que aumenta su temperatura. Es el principio del funcionamiento de un microondas, pensado para hacer girar más rápido a las moléculas de agua presentes en los alimentos. En el caso de IR sucede algo similar pero con la vibración molecular. Los enlaces atómicos están permanentemente vibrando a una frecuencia que se encuentra en el rango de la radiación IR. Así, cuando un cuerpo se irradia con estas longitudes de onda, los diferentes tipos de enlaces van a ir absorbiendo parte de esta radiación para pasar a niveles vibracionales superiores, que también están cuantizados. El resultado es también un mayor movimiento molecular por lo que se traduce también en un calentamiento del cuerpo irradiado.

¿Por qué no absorben IR ni el O₂ ni el N₂? Como hemos dicho antes, un cuerpo absorbe energía cuando la longitud de onda de la radiación incidente estimula algún proceso físico-cuántico para el cual se requiere precisamente esa energía. ¿Cómo se produce esa estimulación? En realidad lo que sucede es una interacción entre el campo electromagnético oscilante de la radiación incidente y algún otro campo oscilante atómico-molecular. En el caso de la vibración molecular, cuando los átomos se desplazan de su posición de equilibrio pueden dar lugar a la modificación del momento dipolar alrededor del enlace originando un campo electromagnético fluctuante. Cuando la radiación incidente tiene la misma longitud de onda que esa fluctuación puede generarse una interferencia constructiva reforzando la fluctuación y pasando ésta a un nivel de energía superior. En moléculas como el O₂ ni el N₂ esto no

puede suceder ya que entre los átomos la diferencia del momento dipolar es siempre cero y no pueden interactuar con el campo electromagnético de la radiación incidente. En el caso del CO_2 , por ejemplo, sólo la banda de tensión antisimétrica y las dos de flexión (una según x y otra según y) serían activas al IR.

La frecuencia exacta de la radiación IR absorbida por un gas depende del tipo de enlaces que posea. Así, el enlace C—H en el metano y el O—H en el agua no absorben IR térmico (procedente de la Tierra), mientras que la vibración del enlace C—F sí. Esto hace que la presencia de moléculas con este tipo de enlaces en la atmósfera conduzca a una intensificación del efecto invernadero.

Los principales gases invernadero

Vapor de agua

Las moléculas de agua son siempre abundantes en el aire, absorbiendo IR térmico alrededor de $6,3 \mu\text{m}$ (1587 cm^{-1}) a través del movimiento de flexión, mientras que las tensiones absorben a unos $2,7 \mu\text{m}$ (sobre 3700 cm^{-1}), por lo que en esa región apenas hay absorción. El agua absorbe también IR térmico para aumentar su energía rotacional alrededor de $18 \mu\text{m}$, en la misma región de máxima absorción de CO_2 , que coincide además con la región de máxima emisión de energía térmica de la Tierra. El agua es el mayor causante del efecto invernadero en nuestro planeta debido a su gran presencia en la atmósfera, aunque es menos eficiente que el CO_2 molécula a molécula.

La presión de vapor del agua aumenta exponencialmente con la temperatura, de manera que el efecto invernadero causado por el agua se verá amplificado por la presencia de otros gases atmosféricos que contribuyan a un aumento de temperatura. Puesto que éste es un efecto indirecto causado por la presencia de otros gases, suele omitirse, mencionando sólo los efectos directos originados por los otros gases cuyos aumentos de concentración debido a causas antropogénicas intensifican el efecto invernadero.

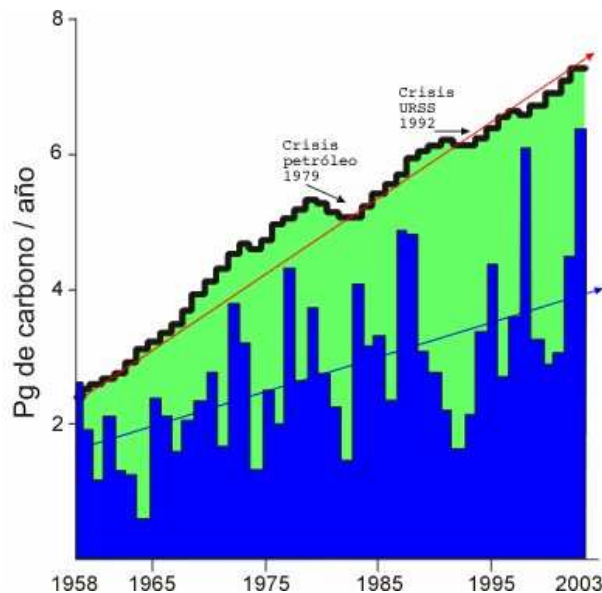
El agua en forma de nubes también absorbe parte del IR térmico, al igual que reflejan una apreciable cantidad de la luz solar incidente. Las nubes de baja altitud reflejan más luz del IR que absorben por lo que contribuyen al enfriamiento del planeta, mientras que las nubes altas ejercen un efecto opuesto. Si la mayor presencia de nubes por una mayor presencia de agua en la atmósfera intensifica o amortigua el efecto invernadero es algo que es todavía desconocido, sobre todo teniendo en cuenta que depende la altitud y de su latitud, no ejerciendo el mismo efecto las nubes ecuatoriales que las situadas en otras regiones.

Dióxido de carbono

El CO_2 es capaz de absorber radiación IR de una longitud de onda de $4,26 \mu\text{m}$ (2347 cm^{-1}) y de $15 \mu\text{m}$ (667 cm^{-1}). Pero sólo esta última existe en cantidad suficiente para producir una absorción significativa por parte del CO_2 . Adicionalmente, el CO_2 absorbe parte de la radiación IR para adquirir energía rotacional entre 12 y 14 y 16 y $18 \mu\text{m}$, cubriendo así un amplio espectro del IR térmico emitido por la Tierra. De esta forma, el CO_2 absorbe cerca de la mitad de la radiación IR térmica emitida por la Tierra, impidiendo que esta radiación escape en su totalidad al espacio exterior.

Muestras de aire atrapado en el hielo en la Antártida muestran que la concentración de CO_2 antes del siglo XVIII era de unas 280 ppm. A día de hoy la concentración debe rondar las 395 ppm, valor que empieza a ser preocupante entre las comunidades de

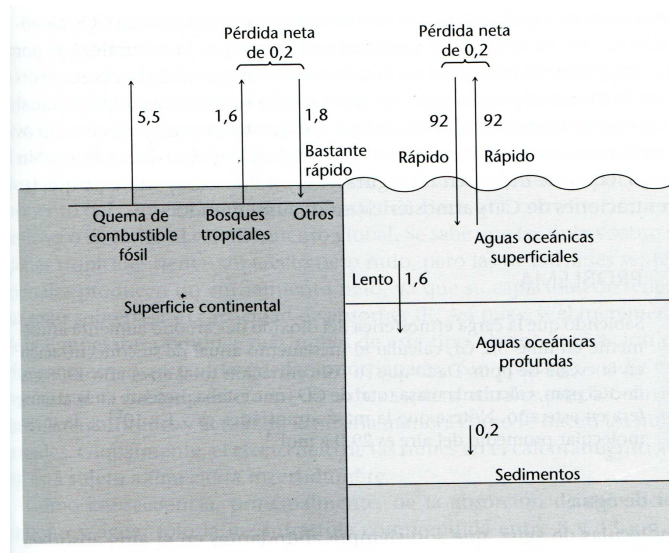
científicos. Existen cambios estacionales de CO_2 debido al crecimiento que las plantas experimentan en primavera y verano, absorbiendo en estas épocas enormes cantidades de CO_2 . El carbono atrapado por las plantas pasa a convertirse principalmente en celulosa, por lo que este carbono se denomina típicamente carbono fijado. Pero la descomposición biológica de las hojas y gran parte de otras fuentes de biomasa llevan a generar nuevamente una gran cantidad de CO_2 libre. De las contribuciones antropogénicas, una buena parte (casi las tres cuartas partes) viene de la quema de combustibles fósiles, principalmente para usos industriales, locomoción y calefacción, y otra (aproximadamente una cuarta parte) de la deforestación, ya que conlleva subsidiariamente la quema de la misma y, por tanto, la liberación del CO_2 antes fijado.



Variación en la cantidad de CO_2 atmosférico en los últimos 50 años

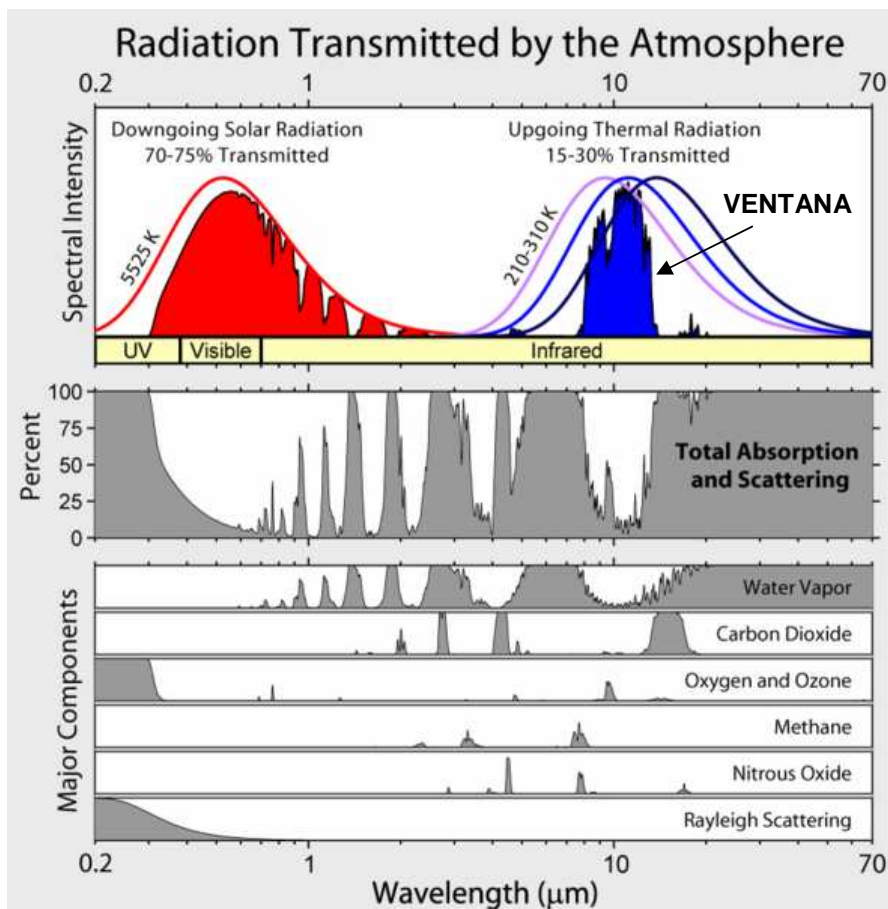
La vida media de una molécula de CO_2 es difícil de estimar ya que no se descompone ni química ni fotoquímicamente. Las plantas y la superficie del mar son sólo sumideros temporales ya que otras moléculas se liberan igualmente. El único sumidero permanente es el paso del CO_2 a aguas profundas en el mar precipitando como CaCO_3 insoluble, pero este proceso tarda cientos de años, por lo que aunque el mar podría absorber gran cantidad del CO_2 atmosférico, la escala temporal del ritmo de producción y absorción es demasiado diferente. Se piensa que se necesitan entre 50 y 200 años para que el CO_2 emitido se reajuste a un nuevo equilibrio siempre y cuando deje de emitirse. Un problema añadido es que si la temperatura media aumenta, el agua se hace menos efectiva para retener el CO_2 por lo que el problema sólo puede tender a agravarse al ritmo de emisiones actual.

Se ha observado que existe una mayor tasa de crecimiento de la materia vegetal debido tanto a la mayor concentración de CO_2 como al aumento de las temperaturas. Este proceso se conoce como **fertilización por CO_2** y parece ser el responsable de una importante fijación de CO_2 para cuya desaparición no había una explicación plausible.



Flujos relativos de CO₂

Como consecuencia de la absorción del IR térmico llevada a cabo principalmente por el agua y el CO₂, la radiación IR emitida por la Tierra entre 8 y 13 μm escapa hacia el espacio sin impedimentos, con excepción de una pequeña fracción a 10 μm correspondiente a la absorción de IR térmico por parte del ozono troposférico. Se dice que esta porción del espectro es una ventana.



Esquemas radiativos sol/Tierra global y por gases

Otras sustancias que afectan al calentamiento global

La inclusión a la atmósfera, incluso en cantidades traza, de gases que puedan absorber la radiación IR térmica, da lugar a un efecto invernadero intensificado, que puede conducir a un proceso de calentamiento global. Es más grave si esta absorción se produce dentro de los límites de la ventana ya que la absorción en las otras regiones por parte del CO₂ y el agua es tan grande, que deja poca radiación para que sea absorbida por otras moléculas presentes en mucha menos cantidad.

Las moléculas diatómicas heteronucleares como CO y NO_x tampoco son eficaces intensificadores del efecto invernadero ya que ambas absorben alrededor del mínimo entre ambas curvas (solar/Tierra), de manera que los gases traza que contribuyen más significativamente al efecto invernadero son:

- Metano
- Óxido nitroso
- Ozono troposférico
- CFCs (HCFCs, halones)
- aerosoles

Gas	Fuente	Abundancia preindustrial	Abundancia actual	Incremento anual actual	Tiempo de residencia	Eficacia instantánea
H ₂ O	Evaporación Combustión Respiración	Variable	Variable	1%	-	-
CO ₂	Combustión Respiración	280 ppm	395 ppm	0.5%	50-200 años	1
CH ₄	Descomposición anaeróbica Combustión Gas natural	0,7 ppm	1,8 ppm	1.2%	12 años	20-27
N ₂ O	Uso de fertilizantes Combustión	0,27 ppm	0,33 ppm	0,3%	120 años	200-230
O ₃ troposférico	Neblumo fotoquímico Combustión	0,01 ppm	0,04 ppm	0,8%	de horas a días	2500-3000
CFC-11	Propelentes Refrigeración Espumas aislantes	0 ppm	0,27 ppm	>0%	50 años	12500
HCFC-22	Neblumo fotoquímico Combustión	0 ppm	0,15 ppm	3,5%	12 años	1000

Tiempo de residencia

Es un parámetro importante ya que cuanto más tiempo permanezca un gas en la atmósfera, mayor será su impacto sobre su efecto invernadero intensificado. Puede definirse como su concentración total dividida por su entrada. Esta relación no sólo admite cantidades totales en gramos, sino también concentraciones. Así, si la concentración media de un gas en la atmósfera es de 6.0 ppm y su entrada anual es de 2.0 ppm, su tiempo de residencia promedio será $6 \text{ ppm} / 2 \text{ ppm} \cdot \text{año}^{-1} = 3 \text{ años}$.

$$T_{\text{rsd}} = C / V$$

Metano

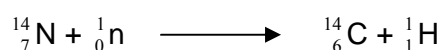
Es el siguiente gas invernadero en importancia tras el agua y el dióxido de carbono. Aunque las vibraciones de tensión caen fuera del IR térmico, las de flexión absorben radiación de 7.7 micras, cerca del límite de la ventana. Cada molécula de metano es entre 20 y 27 veces más efectiva que el CO₂ para originar efecto invernadero, pero dada su mucha menor presencia y tasa de introducción en la atmósfera, su efecto neto es considerablemente inferior. Cerca de un 70% del metano emitido a la atmósfera es de origen antropogénico, siendo la fracción natural un aporte como consecuencia de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica y de los rumiantes debido a la descomposición de la celulosa. Este fenómeno ocurre a gran escala cuando dicha descomposición se realiza en condiciones de saturación de agua, como en pantanos, ciénagas, humedales y marismas, y de ahí su nombre de 'gas de los pantanos'. Lo mismo sucede cuando se inundan terrenos para crear centrales hidroeléctricas, lo que hace que su efecto no sea cero sobre su contribución a los gases invernadero.

Respecto a las fuentes antropogénicas podemos resaltar los purines de las granjas, los basureros, los combustibles fósiles, la quema de biomasa y los arrozales (por las razones expuestas anteriormente), y siguiendo aproximadamente el orden

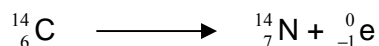
Ganado > arroz >> vertederos = minería del carbón > quema de biomasa = quema de gas natural

Se puede deducir el origen del CO₂ atmosférico a partir de técnicas de datación radiométrica de ¹⁴C. Esto es así porque este isótopo debería de estar en equilibrio en la atmósfera y en la materia viva, ya que lo está asimilando constantemente a partir de las plantas a través de la fotosíntesis. Esto permite además conocer la fecha de la muerte de un organismo vivo hasta unos 60000 años atrás. Sin embargo, en el caso del metano, existe un desequilibrio, encontrando que la fracción de carbono-14 atmosférico es menor que la que existe en los tejidos vivos. Eso indica que debe de existir un fuente de carbono orgánico antiguo que provoca estos desequilibrios. La mayor de estas fuentes se debe al petróleo y a las minas de carbón (en el carbón, durante la carbonificación, quedan atrapados en el mineral grandes cantidades de gases que se denominan de forma genérica grisú, el cual tienen diferentes composiciones y que es generalmente de naturaleza explosiva. En general, se genera en poca cantidad una vez que el carbón es expuesto al aire ya que disminuye la presión superficial y se abren poros, y así el gas escapa. El principal componente del grisú es el metano). Con estas medidas radiométricas se pueden detectar incluso la presencia de fugas en gaseoductos. Otra fuente de metano antigua es el permagel de latitudes muy septentrionales, cuando las temperaturas en esta zona eran mayores y había plantas.

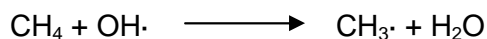
Carbono-14. Existen tres isótopos naturales del carbono: el ¹²C (98,89%), el ¹³C (1,11%), ambos estables, y el ¹⁴C, que es radiactivo (1·10⁻¹⁰%). Su período de semidesintegración es de 5730 años y fue descubierto en 1940. Si no existiera una fuente continua y estable de carbono-14 no tendría sentido el poder medir nada con este isótopo ya que habría desaparecido hace millones de años. Se forma en las capas altas de la atmósfera cuando neutrones cósmicos inciden sobre los átomos de nitrógeno del nitrógeno molecular disociado fotoquímicamente. Éste se transforma en carbono-14 por emisión de un protón.



Luego, este carbono se oxida rápidamente a CO₂ por la presencia de oxígeno atómico. La desintegración del carbono 14, tiene lugar por emisión de radiación beta al transformarse un neutrón en un protón.



Respecto a los sumideros de metano, el mayor es su reacción con el radical hidroxilo, que explica un 90% de su pérdida del aire, como la primera de una serie de etapas que lo transforman en CO₂. Su vida media en la atmósfera está entre 10 y 15 años.



Otros sumideros consistirían en su absorción en el suelo y su pérdida a la estratosfera. Una fracción de las moléculas que pasan a la estratosfera van a reaccionar a su vez con más radicales hidroxilo, cloro y bromo atómicos (radicales) y oxígeno atómico excitado. Con esta última reacción se generan nuevos radicales hidroxilo y agua.

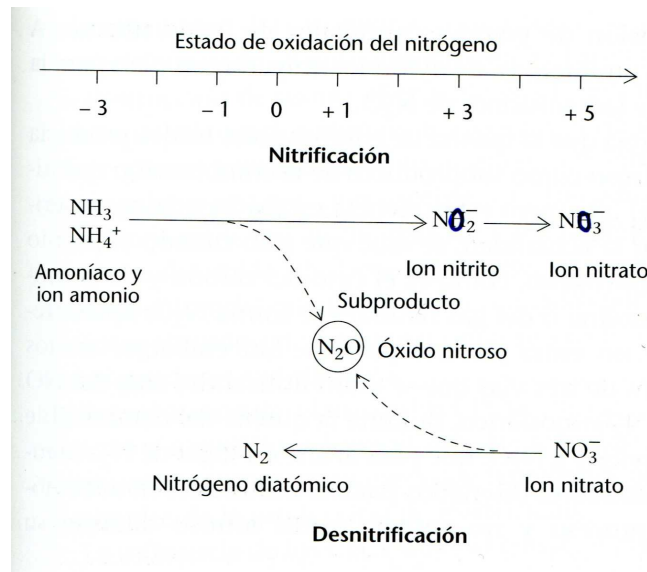
Este vapor de agua estratosférico actúa como un gas invernadero significativo. Alrededor de una cuarta parte del calentamiento global producido por el aumento de las emisiones se debe a esta agua.

El calentamiento global produce fenómenos de retroalimentación positiva (un resultado amplifica la causa de dicho resultado y origina un resultado mayor). Por ejemplo, esto sucede con el vapor de agua y algunos científicos han sugerido que también sucede con el metano, ya que, por ejemplo, la descomposición anaeróbica de la biomasa se acelera con la temperatura. Cuando sucede lo contrario se habla de retroalimentación negativa. El problema es que la descomposición sucede en situaciones de saturación de agua, pero como los regímenes de lluvias pueden cambiar, puede que esto no sea cierto. Adicionalmente, se da el caso de que existe en el permafrost mucho metano aún retenido por lo que un aumento de la temperatura podría liberar más metano. De igual forma hay mucho metano almacenado en los océanos en forma de hidrato de metano (CH₄·6H₂O), que consiste en un aprisionamiento de metano en una estructura tridimensional pseudo-cristalina de moléculas de agua. Es lo que se denomina compuesto clatrato, que es una estructura singular que se forma cuando moléculas pequeñas ocupan los espacios que existen en una estructura poliédrica de tipo jaula formada por otras moléculas. Los clatratos se forman en condiciones de alta presión y baja temperatura. Pues el aumento de temperatura también podría contribuir a la liberación de más metano. En cualquier caso hay que tener en cuenta que la liberación de grandes cantidades del metano retenido pondría en serio peligro a la habitabilidad en la Tierra, ya que podría originar fenómenos de retroalimentación positiva imparables, según algunos científicos.

El óxido nitroso (N₂O)

Otro importante gas invernadero es el óxido nitroso, también conocido como gas hilarante o gas de la risa. Es conveniente recordar que se trata de un gas cuya estructura responde a la forma asimétrica NNO, por lo que presenta un momento dipolar neto que le permite absorber radiación de microondas e IR mediante vibraciones moleculares. Así, su vibración de flexión absorbe IR de 8,6 μm, esto es, dentro de la ventana del espectro, y una de sus tensiones casi en su comienzo, a 7,8 μm, justo donde también lo hace el metano. Por molécula es entre 200 y 230 veces más efectivo que el CO₂ para producir un aumento del calentamiento global. Como el metano, su concentración era más o menos constante antes de la era industrial,

pasando de 0,27 ppm a 0,33 ppm, lo que origina un tercio de la magnitud del calentamiento inducido por el metano, aproximadamente.



Nitrificación anaerobia y desnitrificación aerobia

La mayor parte del suministro natural proviene de los océanos y de los suelos de las regiones tropicales, al ser un gas subproducto de los procesos de desnitrificación biológica en ambientes aeróbicos, y de los de nitrificación biológica en ambientes anaerobios. En la desnitrificación, el nitrógeno oxidado en forma de nitrato se reduce mayoritariamente a nitrógeno molecular, mientras que en la nitrificación, el nitrógeno reducido en forma de amoníaco o ión amonio se oxida para dar iones nitrito y nitrato. La presencia de óxido nitroso en ambos procesos es fácil de explicar como resultado de la presencia de oxígeno en la desnitrificación y su ausencia en la nitrificación. Se ha establecido, que el proceso de nitrificación (oxidación) es más importante en la generación de N_2O , emitiéndose 10^{-3} moles del mismo por mol de nitrógeno oxidado.

Los vertederos son también una fuente de este gas debido a los procesos de desnitrificación que tienen lugar en ellos, así como los fertilizantes a base de amonio y/o nitratos los cuales explican la mayoría de las emisiones antropogénicas. Otra de las fuentes antropogénicas ya eliminada era el uso de ácido nítrico para generar ácido adípico, que es un precursor en la fabricación del nylon.

No existen sumideros de óxido nitroso en la atmósfera por lo que puede eventualmente pasar a la estratosfera y allí absorber luz UV para descomponerse en nitrógeno y oxígeno atómico, o bien reaccionar con oxígeno atómico presente para dar radicales de óxido nítrico.

Ozono troposférico

Al igual que el metano y el óxido nitroso, el ozono es un gas invernadero natural, pero éste tiempo un tiempo de residencia corto. La vibración de tensión antisimétrica ocurre entre 9 y 10 μm , es decir, en la ventana del espectro. La de flexión tiene lugar a 14.2 micras, cerca del CO_2 , por lo que ésta no contribuye mucho a la intensificación del efecto invernadero ya que gran parte de esta radiación será preferentemente absorbida por el CO_2 , contribuyendo así con un 10% del total del potencial de calentamiento global de los gases invernadero.

El ozono se forma por los procesos de combustión llevados a cabo en centrales térmicas, vehículos a motor, calderas, incendios, y por procesos naturales.

Los CFCs y sus sustitutos

Los compuestos carbonados que presentan enlaces C-Cl y, especialmente C-F, tienen un potencial de inducción al calentamiento global muchos miles de veces superior al del CO₂ debido a varias razones: son muy persistentes en la atmósfera, las tensiones y flexiones caen en la ventana del espectro por lo que ninguna radiación de este rango de longitudes de onda es atrapada por los reyes del efecto invernadero (CO₂ y H₂O). Por ejemplo, la tensión C-F tiene lugar a 9 micras.

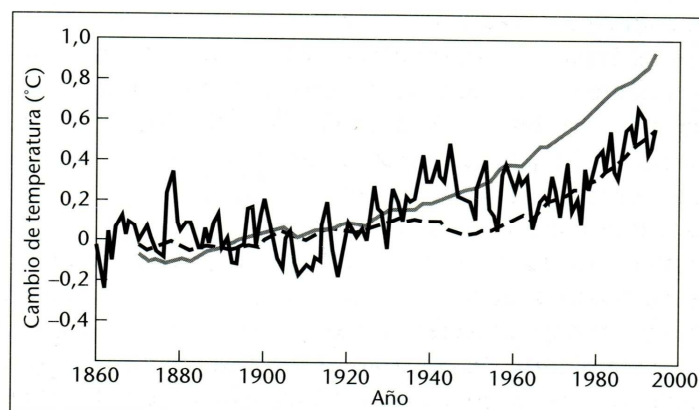
Sin embargo su efecto neto no es muy grande debido a que proporcionalmente hay muchas menos moléculas y a que parte de estos CFCs causan la destrucción del ozono enfriando así la estratosfera (al haber menos ozono, más rayos UV pasan a la atmósfera baja). Debido a que los fenómenos de calentamiento y de enfriamiento llevados a cabo por estos gases ocurren a tan diferentes altitudes, los efectos sobre el clima global son desconocidos.

Paradójicamente el uso de estos gases tan eficientes en congeladores, frigoríficos y aparatos de aire acondicionado ha aumentado considerablemente su eficiencia energética, reduciendo así las emisiones globales de CO₂ debido al uso de estos aparatos.

Su influencia sobre el clima se reducirá en los próximos años desde que en 1995 se prohibiera su uso en los países desarrollados según el Protocolo de Montreal. Sus sustitutos desde entonces (HCFCs y HCFs) tienen vidas atmosféricas mucho más cortas y absorben menos eficientemente en la ventana del espectro por lo que suponen una menor amenaza.

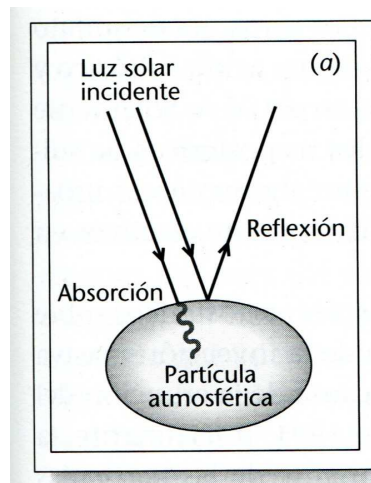
Efectos de los aerosoles sobre la modificación del clima

Solo hace pocos años que se ha reconocido el importante papel que juegan los aerosoles (principalmente de sulfato) de forma que se han introducido en simulaciones por ordenador de la atmósfera. La eficacia de los aerosoles para enfriar la atmósfera no era antes tomada en cuenta por lo que los modelos preveían un aumento mucho más significativo de la temperatura media.



Temperatura simuladas (líneas de tendencia). La línea sólida corresponde con la omisión y la punteada con la introducción de los aerosoles en el modelo

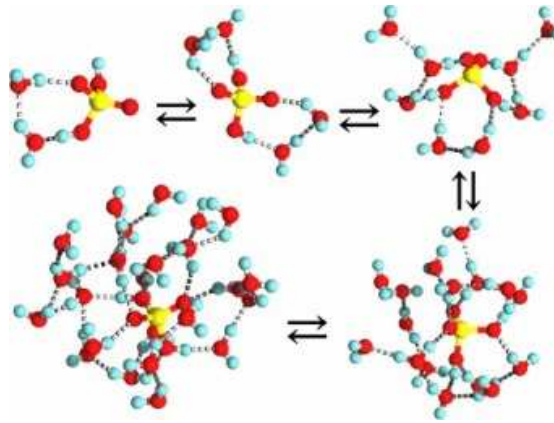
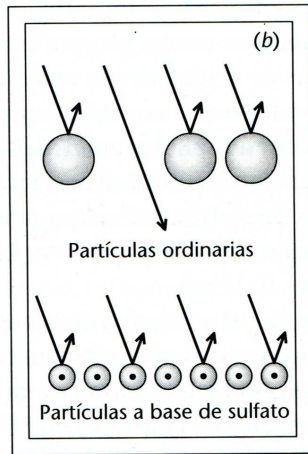
La materia particulada de mayor importancia en este contexto es la que emiten los volcanes y que llega a la alta atmósfera, junto con las emisiones industriales que se inyectan en la baja troposfera. Así, pues, el SO_2 emitido puede pasar a SO_3 y llevar finalmente a la formación de aerosoles de sulfato. Éstos son capaces de interceptar parte de la luz que nos llega, contribuyendo al enfriamiento de la troposfera. De hecho, toda la materia particulada tiene la capacidad de reflejar en mayor o menor medida parte de la luz incidente, a través de fenómenos como la dispersión y la retrodispersión. La fracción de luz reflejada por una superficie se denomina albedo y toma el valor 1 para una reflexión perfecta (como la nieve) o 0 para una reflexión nula (el suelo suele tener valores en torno a 0,1). Adicionalmente, algunos tipos de aerosol pueden absorber ciertas longitudes de onda del IR solar, energía que se transforma en calor debido al choque entre las propias partículas por el consiguiente aumento de energía cinética. Esta forma de actuar es significativa solo para partículas oscuras, como las de los hollines y las cenizas volcánicas. Los aerosoles de sulfato, por ejemplo, **no** absorberían radiación que contribuiría a un calentamiento ya que su absorción se centra más bien en el visible y el UV-A.



Acción de la luz sobre una partícula

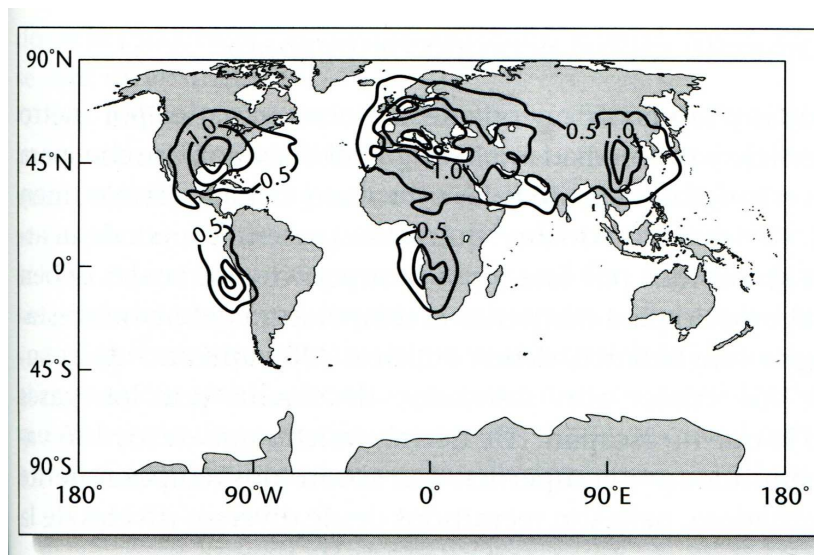
Un ejemplo drástico de la influencia de la materia particulada tuvo lugar en 1991 con la erupción del Pinatubo, en Filipinas, que hizo descender la temperatura media de la Tierra a nivel del suelo en varias décimas al crearse aerosoles de sulfato permanentes a lo largo de varios años a partir de las 30 millones de toneladas de SO_2 emitidas, aunque la temperatura de la estratosfera aumentó a consecuencia de la absorción IR de las diferentes formas de materia particulada, descendiendo a medida que ésta iba sedimentando.

Algunos científicos han argumentado que además del *efecto directo* de los aerosoles, también existe un *efecto indirecto* significativo que contribuye al enfriamiento, ya que las partículas del aerosol actúan como núcleos para la formación de más gotas pequeñas de agua que contribuirían a aumentar la reflexión de la luz al ser más efectivas para retrodispersar la misma actuando como pequeños espejos.



Reflexión reforzada por la formación de pequeñas partículas formadas por la nucleación de agua alrededor de las partículas de sulfato

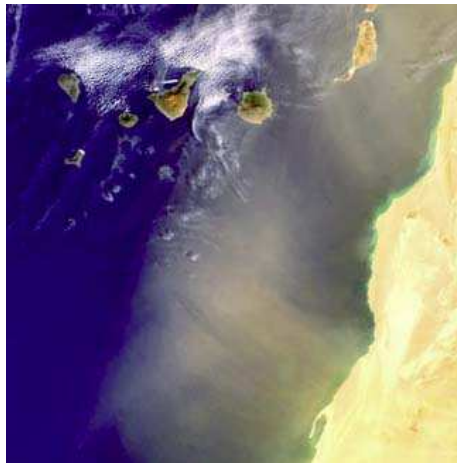
El efecto de enfriamiento por aerosol se concentra casi exclusivamente en el hemisferio norte debido a la mayor actividad industrial en esta parte del planeta. Además, debido a su relativamente corta vida en la atmósfera, se impide su difusión hacia el hemisferio sur. El diámetro promedio de estas partículas en la troposfera es de 0,4 micras y su altitud media de apenas medio kilómetro. Con estos parámetros, su vida media debería de ser de unos años, sin embargo, ya que son eficazmente eliminadas por la lluvia, su actual vida media es del orden de días/semanas. El problema es que existe un aporte prácticamente continuo que renueva su formación, lo que supone una cantidad estacionaria de aerosol en la troposfera. La evolución, no obstante, de la formación de este tipo de aerosoles, debe de tender a disminuir debido a las tendencias actuales de disminuir este tipo de emisiones en los países desarrollados al ser causantes de la lluvia ácida. El problema es que esta tasa de disminución puede verse compensada por la mayor emisión de países en vías de desarrollo como China e India.



Mapa en W/m^2 , indicando el efecto reflectante de los aerosoles según su localización geográfica

Los aerosoles también se producen debido a la oxidación del sulfuro de dimetilo, $(\text{CH}_3)_2\text{S}$, el cual se origina a su vez del fitoplancton marino. Una vez en la troposfera se oxida parcialmente a SO_2 (que dará ácido sulfúrico en etapas posteriores) y otra lo hace a ácido metanosulfónico, $\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$. Ambos forman aerosoles provocando un enfriamiento en la troposfera. Algunos científicos piensan que el propio calentamiento acelerará las emisiones de sulfuro de dimetilo por parte de los océanos lo que mitigará los efectos de los gases invernadero.

Otros aerosoles generados por partículas de polvo en suspensión, como los provenientes de zonas áridas, tienen solo efectos locales, tanto en el espacio como en el tiempo, siendo además estacionales. Por tanto, aunque su efecto local puede ser muy notable, no lo es tanto su efecto global. Suele estar sometido a una deposición seca, aunque son también notables las lluvias de barro que pueden tener lugar en forma de tormentas en verano.

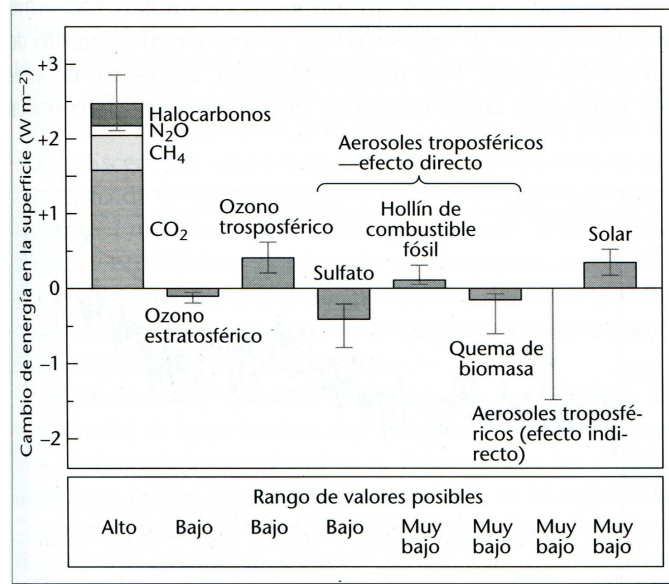


Aerosol sahariano de arena barriendo el atlántico canario

Diferencias entre diferentes aerosoles de polvo y de agua

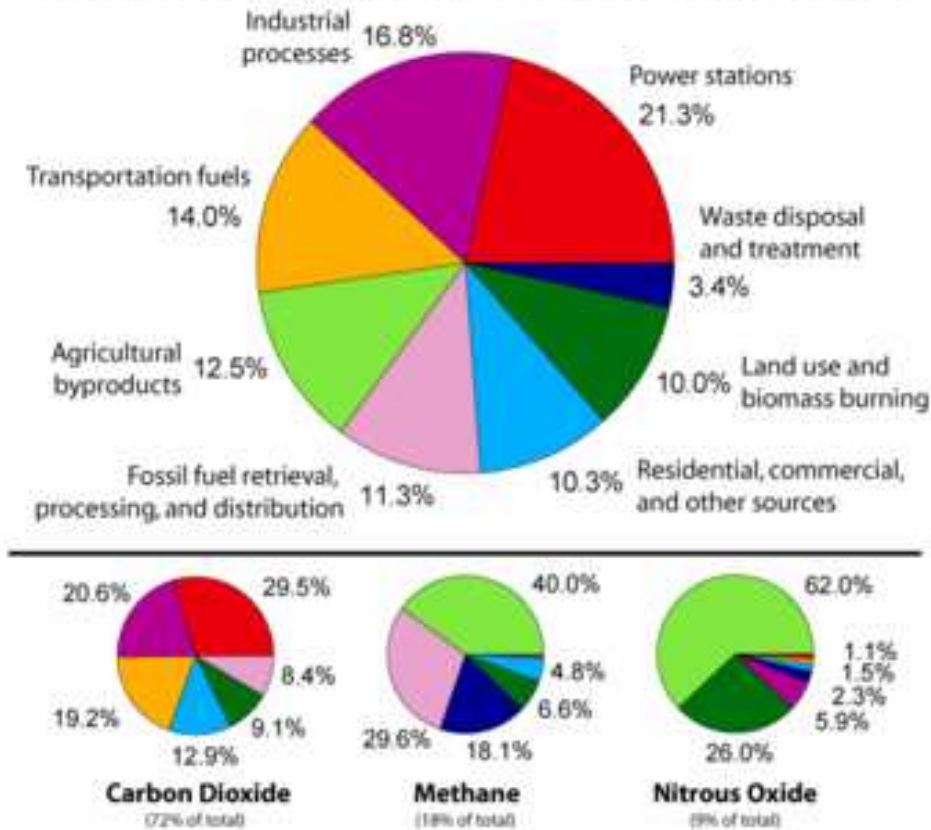
<i>Meteoro</i>	<i>Visibilidad</i>	<i>Humedad</i>	<i>Aerosol</i>
Lluvia	< 3 km	100 %	Agua o hielo
Llovizna	< 1 km	100 %	Agua o hielo
Niebla	< 1 km	90-100 %	Agua o hielo
Neblina	1 a 2 km	80-90 %	Agua o hielo
Calima	> 2 km	< 80 %	Partículas sólidas
Bruma	< 2 km	< 80%	Partículas sólidas

Gráficos-resumen del forzamiento radiativo relativo de las diferentes contribuciones al efecto invernadero intensificado y emisiones por sectores



Contribuciones relativas al efecto invernadero intensificado de las diferentes aportaciones

Annual Greenhouse Gas Emissions by Sector

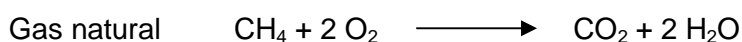
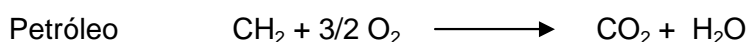
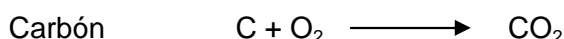


Emisiones de gases invernadero por sectores

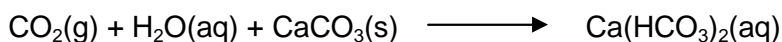
Minimización de las emisiones futuras de CO₂

Al diseñar estrategias que vayan encaminadas a la reducción de emisiones de CO₂, obviando el empleo de fuentes alternativas de energía, se han de tener en cuenta las reacciones implicadas en el quemado de cada uno de los combustibles empleados.

En una aproximación bastante razonable, se puede decir que la cantidad de calor liberada cuando se quema una sustancia es directamente proporcional a la cantidad de oxígeno que consume. A partir de aquí también se pueden comparar las cantidades de CO₂ emitidas en cada caso. Escribiendo las ecuaciones de tal forma que siempre se emite una única molécula de CO₂, podemos usar estas ecuaciones para comparar el oxígeno consumido en cada caso, y de ahí estimar el rendimiento de su potencia calorífica.

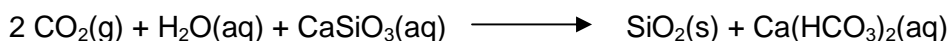


Sin embargo, el problema del gas natural es que las canalizaciones originan una ingente fuente de emisión de metano a la atmósfera por pérdidas, lo que hace que parte de las ventajas se desvanezcan haciéndolo en ocasiones incluso peor. En el futuro, en todo caso, deberá eliminarse químicamente el CO₂ emitido por las centrales térmicas, que actualmente se emite sin más a la atmósfera. Esto podría llevarse a cabo de varias formas. El CO₂ recuperado podría inyectarse en las profundidades oceánicas, o en acuíferos muy profundos, o bajo tierra en pozos de petróleo o de gas natural vacíos, o incluso en vetas de carbón. Cerca del fondo marino podría reaccionar con el carbonato cálcico de las conchas marinas para generar bicarbonato cálcico soluble.



A profundidades muy elevadas (>3,5 Km), la densidad del CO₂ excedería a la del agua marina, pudiendo así formar un lago de CO₂ casi puro al comportarse bajo estas condiciones como un fluido supercrítico.

Otra alternativa a su enterramiento, sería la de hacerlo reaccionar químicamente con alguna otra sustancia que permitiera generar otros productos igualmente necesarios para el hombre. Por ejemplo, hacerlo burbujear sobre una disolución de silicato cálcico (mineral abundante y barato) para transformarse en sílice (arena) y bicarbonato cálcico que podría drenarse hacia las profundidades oceánicas.



También se ha sugerido la posibilidad de burbujearlo en la tierra en zonas donde existan muchos huecos y grietas. De esta forma, ayudado por los microorganismos presentes en la roca, este CO₂ podría reaccionar con los aluminosilicatos presentes en la roca para generar carbonato cálcico. Este proceso es factible, siempre y cuando las reacciones tengan lugar con una rapidez suficiente.

Un problema añadido es la energía requerida para llevar a cabo estos procesos de secuestro de CO₂.

Una forma de extraer el dióxido de carbono que ya está disperso en la atmósfera y depositarlo en las profundidades del océano es mediante un proceso conocido como **fertilización con hierro**. Se sabe que hay déficit de plancton en ciertas regiones marinas por su déficit de hierro. La adición artificial de hierro en estas zonas, podría promover el crecimiento masivo de plancton que captaría una gran cantidad de CO₂ para la actividad fotosintética. También puede eliminarse haciendo crecer plantas elegidas deliberadamente. Algunas empresas y países han conseguido créditos extra de emisiones por esta vía. Otros proponen utilizar las emisiones de las centrales térmicas para hacer crecer algas que puedan ser empleadas como combustible.

Hay quien postula igualmente que la generación de sistemas más eficientes podría no llevar a una reducción de emisiones a largo plazo, ya que estos sistemas se usarían más. El ejemplo está en el uso de un coche que gasta poco, con el que puedes realizar más viajes, por lo que las emisiones pueden resultar iguales en uno u otro caso. Es lo que se viene en llamar *efecto rebote*.